Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ В АПК

Харків,
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА ОБЛАСНА ВІЙСЬКОВА АДМІНІСТРАЦІЯ

Державний біотехнологічний університет
Національний технічний університет «ХПІ»
Національний університет «Львівська політехніка»
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України
University Maryland (USA)
University of British Columbia (Canada)
Lublin University of Technology (Poland)
Israel Electric Corporation (Israel)

Матеріали
Міжнародної науково-практичної конференції
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ В АПК

5 листопада 2025 р.

м. Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА ОБЛАСНА ВІЙСЬКОВА АДМІНІСТРАЦІЯ
Державний біотехнологічний університет
Національний технічний університет «ХПІ»
Національний університет «Львівська політехніка»
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України
University Maryland (USA)
University of British Columbia (Canada)
Lublin University of Technology (Poland)
Israel Electric Corporation (Israel)

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ В АПК

Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції

5 листопада 2025 р.

Харків
ДБТУ
2025

УДК 621.3.620.9]:631]](06)
Е50

Організаційний комітет:
Голова комітету: **Михайлов В.М.**, д.т.н., проф., проректор з наукової роботи ДБТУ;
Заступник голови: **Сорокін М.С.,** к.т.н., доц., декан факультету енергетики, робототехінки та комп'ютерних технологій ДБТУ;
Вчений секретар оргкомітету конференції: **Лисиченко М.Л.**, д.т.н., проф., професор кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ;
Члени оргкомітету: **Адамчук В.В.**, д.т.н., проф., академік НААН України, директор Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України; **Каплун В.В.**, д.т.н., проф., директор навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП; **Гапон Д.А.**, д.т.н., доц., завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки НТУ «ХПІ»; **Щур І.З.**, д.т.н., проф., завідувач кафедри електромеханіки і комп'ютерних електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка»; **Головко В.М.**, д.т.н., проф., професор кафедри відновлювальних джерел енергії, КПІ ім. І. Сікорського; **Кіпенський А.В.**, д.т.н., проф., директор навчально-наукового інституту соціально-гуманітарних технологій; **Михайлова Л.М.,** к.т.н., проф., директор навчально-наукового інституту енергетики ЗВО «Подільський державний університет»; **Мірошник О.О.**, д.т.н., проф., завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту ДБТУ; **Хандола Ю.М.**, к.т.н., доц., завідувач кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ; **Петренко О.В.**, к.т.н., доц., завідувач кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування ДБТУ; **Демченко К.В.,** к.т.н., доц., завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ; **Мороз О.М.**, д.т.н., проф., професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту ДБТУ; **Косуліна Н.Г.**, д.т.н., проф., професор кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ; **Потапов В.О.**, д.т.н., проф., професор кафедри інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування ДБТУ; **Vasily Krivtsov**, Ph.D., R.Eng., Professor, University of Maryland (USA); **Juri Jatskevich**, Ph.D., P.Eng., Professor, IEE Fellow Electrical and Computer (Canada); **Pawel Komada**, Professor, Ph.D., D.Sc., Head Department of Electronics and Information Techniques, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Lublin University of Technology (Poland); **Vladimir Gurevich**, Honorary Professor, Senior Specialist, Israel Electric Corporation (Israel).

Збірник матеріалів видано відповідно до наказу в.о. ректора ДБТУ про проведення Міжнародної науково-практичної конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК» (№ 01-01/403 від 31.10.2025 р.).

Е50 **Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК** [Електронний ресурс] : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 5 листопада 2025 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків, 2025. – 348 с. – Електронні текстові дані. – Режим доступу : http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/

У збірнику подано теоретичні та практичні результати досліджень і розробок учених спільно з молодими науковцями, аспірантами, співробітниками організацій та підприємств.

Призначено для викладачів, студентів, наукових співробітників, фахівців у галузі енергетики, електромеханіки, робототехніки, автоматики, інформаційних технологій, енергетичного машинобудування, біомедичної інженерії.

УДК 621.3.620.9]:631]](06)

© Державний біотехнологічний університет, 2025

СЕКЦІЯ 1. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ МЕРЕЖ 10–35 КВ У КОНТЕКСТІ ПОТОЧНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Бахметьєв В. В., асп., e-mail: vladdp70@gmail.com
Жорняк Л. Б., к.т.н., доц., e-mail: zproton@zp.edu.ua
Національний університет «Запорізька політехніка»

Актуальність дослідження. Мережі розподілу електроенергії напругою 10–35 кВ виконують роль зв'язуючої ланки між магістральними високовольтними системами і локальними низьковольтними мережами 0,4 кВ.

Системи середнього класу напруги є опорною частиною електроенергетичної інфраструктури держави. Вони забезпечують передавання енергії від вузлів вищої напруги до споживачів нижчого рівня, формуючи розгалужену мережу ліній і підстанцій, що охоплює як міські агломерації, так і сільські та віддалені райони.

Довжина ліній мережі усіх класів напруги в Україні оцінюється приблизно у 1,03 млн км. Зокрема: мережі 0,4 кВ мають протяжність близько 620–650 тис. км, лінії 6–10 кВ – орієнтовно 260–280 тис. км, лінії 35 кВ – близько 55–65 тис. км, а високовольтні магістралі 110 кВ і вище – близько 70–80 тис. км [1].

У підсумку, мережі 10–35 кВ разом охоплюють приблизно 30–33 % загальної довжини ліній мережі країни, що становить близько 310–340 тис. км. Серед них переважають повітряні лінії – понад 85 %, тоді як кабельні складають близько 15 %. У великих містах частка підземних кабельних мереж поступово зростає, досягаючи 30–35 % від загальної довжини.

Метою дослідження є аналіз та узагальнення статистичних даних, наведених у літературних джерелах, щодо протяжності, складу та ступеню зносу таких основних елементів мереж, як повітряні і кабельні лінії, трансформаторні підстанції, комутаційна апаратура.

Основні матеріали досліджень. До лютого 2022 року стан розподільчих мереж 10–35 кВ був нерівномірним: у містах і промислових центрах завдяки інвестиціям мережі підтримувалися в задовільному стані, тоді як у сільській місцевості переважали зношені повітряні лінії з обмеженим ресурсом. Перед війною планувалося поступове оновлення мереж і трансформаторів, але темпи модернізації стримувалися фінансовими, адміністративними та логістичними чинниками [2].

За даними Міненерго та операторів системи, середній рівень фізичного зносу елементів мереж 10–35 кВ залишається досить високим. Повітряні лінії 10 кВ мають середній знос 50–55 %, а в окремих випадках — до 65 %. Для повітряних ліній 35 кВ цей показник становить 45–50 %, із максимальним рівнем до 60 %. Кабельні лінії 10–35 кВ зношені менше – у середньому на 35–40 %, однак подекуди їхній знос сягає 50 %. Трансформатори 10/0,4 кВ мають близько 45 % середнього зносу, іноді досягаючи 70 % [3].

Технічні втрати в українських розподільчих мережах становлять 11–14 %, у мережах 10–35 кВ – 6–8 %, що удвічі вище за європейський рівень. Коефіцієнт готовності системи 0,94–0,96 проти 0,99 у ЄС, тобто споживачі щороку мають 15–25 годин перерв [4]. Щороку трапляється близько 20 тис. аварій, переважно через пошкодження ізоляції, опор або короткі замикання. Зношеність мереж нерівномірна: понад 60 % у східних, 45–50 % у центральних і 35–40 % у західних регіонах. Така різниця ускладнює планування модернізації та управління енергосистемою [3].

Аналіз вікового складу обладнання мереж 10–35 кВ показує високий рівень зношеності: лише 8 % установок нові (до 10 років), 25 % – віком 10–20 років, 40 % — 20–30 років і ще 27 % перевищили 30-річний термін [3]. Більшість повітряних ліній (понад 70 %) спираються

на дерев’яні та залізобетонні опори із середнім строком служби понад 28 років, що потребує масштабної заміни. У трансформаторних підстанціях переважають установки 250–630 кВА, з яких понад дві третини експлуатуються понад пів ресурсу – 40 % виготовлені до 1995 року, 25 % – до 1980-го.

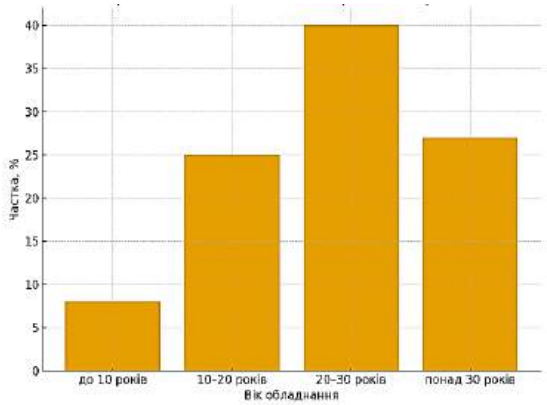


Рисунок 1 – Віковий розподіл обладнання мережі 10–35 кВ

Повномасштабна війна, розпочата країною-агресором РФ у 2022 році, радикально змінила стан енергосистеми України. Мережі 10–35 кВ зазнали значних руйнувань, а збитки енергетичного сектору до 2024 року оцінили у $8–11 млрд, переважно через пошкодження розподільчих систем [2]. Оператори зіштовхнулися з гострим дефіцитом обладнання: через зупинку постачань і перевантаження європейських виробників термін виготовлення трансформаторів подовжилися до 1–1,5 років, а ціни зросли майже вдвічі. Внаслідок бойових дій кількість механічних ушкоджень різко зросла – на сході зруйновано понад 25 % підстанцій. До того ж ремонтні роботи у прифронтових районах ускладнені безпековими обмеженнями, що збільшило час відновлення на 35–50 %. Дефіцит генерації та зміна споживчих режимів призвели до браку потужності до 20 % і частих аварійних відключень.

Висновок. Оцінка стану розподільчих мереж 10–35 кВ свідчить, що ще до початку повномасштабної агресії вони мали суттєві експлуатаційні недоліки, нерівномірно розподілені між регіонами [4]. Війна радикально загострила ситуацію: численні прямі руйнування об’єктів, скорочення обсягів генерації, збільшення кількості аварій та ускладнення логістики і безпеки для ремонтних команд істотно вплинули на стабільність системи. Зведені показники, які можуть складати від мільярдних сум прямих збитків до тисяч зафіксованих пошкоджень, а отже, суттєвого зменшення вироблення електроенергії, підтверджують масштабність проблеми. У сучасних умовах відновлення та підтримання надійності роботи електромереж потребує узгоджених дій на всіх рівнях – технічному, організаційному, фінансовому та гуманітарному.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Показники якості надання послуг у сферах електропостачання і централізованого водопостачання та водовідведення у 1-му півріччі 2022 року. URL: https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Sfery_ElektroEnergiia/Monitoring_elekrto/Zvit_pokaznyky_yakosti-poslug_1kv_2022.pdf

2. Kyiv School of Economics. Report on damages to infrastructure from the destruction caused by Russia’s military aggression against Ukraine as of January 2024 / аналітичний звіт. — Київ: KSE, 2024. — 39 с.

3. Annual Implementation Report 2024 Ukraine / Energy Community Secretariat. — Відень: Energy Community, 2024. — 48 с.

4. Жорняк Л. Б., Бахметьєв В. В., Левченко О. П. Підвищення ефективності роботи розподільчих мереж ліній 10–35 кВ за рахунок автоматичних пунктів секціонування. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р. Харків: Держ. біотехнологічний ун-т, 2024. С. 16–17.

УДК 005.311.6:621:658.5

МОДЕЛІ ТА ІНСТРУМЕНТИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

Боровик Н. В., викл., e-mail: nata_borovik777@ukr.net
Державний навчальний заклад «Лісоводський професійний аграрний ліцей»
Боровик Д. О., студ., e-mail: denisbor044@gmail.com
Хмельницький національний університет

Актуальність дослідження. В умовах енергетичної кризи, зростання цін на енергоносії та необхідності зниження викидів парникових газів питання ефективного управління енергоресурсами набуває особливої ваги. Сучасні підприємства, установи та громади стикаються з потребою приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації енергоспоживання, модернізації інфраструктури та впровадження відновлюваних джерел енергії.

Традиційні підходи до управління енергетичними процесами вже не забезпечують належного рівня ефективності, оскільки вони не враховують складність сучасних енергетичних систем, динамічність ринку та вплив зовнішніх факторів. У цьому контексті особливого значення набувають системи підтримки прийняття рішень (СППР), які дають змогу комплексно аналізувати великі обсяги даних, моделювати різні сценарії розвитку та прогнозувати наслідки управлінських дій.

Застосування СППР у сфері енергоменеджменту дозволяє підвищити ефективність використання енергоресурсів, зменшити фінансові витрати, забезпечити стабільність енергопостачання та сприяти реалізації принципів сталого розвитку. В умовах цифрової трансформації економіки та впровадження інтелектуальних технологій проблема дослідження моделей і інструментів підтримки прийняття рішень у енергетиці є надзвичайно актуальною як на національному, так і на глобальному рівні.

Метою дослідження є аналіз та узагальнення сучасних моделей і інструментів підтримки прийняття рішень у сфері енергоменеджменту, а також визначення шляхів підвищення ефективності управління енергетичними ресурсами на основі використання інтелектуальних інформаційних технологій.

Досягнення цієї мети передбачає:

- вивчення принципів побудови та функціонування систем підтримки прийняття рішень у сфері енергетики;
- аналіз можливостей використання аналітичних, математичних і прогнозних моделей у процесі енергоменеджменту;
- оцінку впливу цифрових технологій (зокрема, штучного інтелекту, машинного навчання, великих даних) на ефективність управлінських рішень;
- розроблення рекомендацій щодо впровадження сучасних СППР для підвищення надійності, економічності та екологічності енергетичних систем.

Основні матеріали досліджень. Сучасний енергоменеджмент базується на інтеграції технічних, економічних та інформаційних аспектів управління енергетичними процесами. В умовах динамічних змін енергетичного ринку, зростання обсягів споживання електроенергії та підвищених вимог до енергоефективності традиційні методи аналізу втрачають свою ефективність. Саме тому у світовій практиці все ширше впроваджуються системи підтримки прийняття рішень (СППР), що поєднують аналітичні моделі, бази даних та інтелектуальні алгоритми.

Одним із головних напрямів розвитку СППР є використання математичних моделей та алгоритмів штучного інтелекту, які забезпечують автоматизований аналіз великих масивів даних. Моделі прогнозування, засновані на методах машинного навчання, дозволяють з високою точністю оцінювати попит на енергію, виявляти аномалії у роботі систем і передбачати можливі збої. Це підвищує стабільність енергопостачання та сприяє зниженню експлуатаційних витрат.

Значну роль у підвищенні ефективності енергоменеджменту відіграють інформаційно-аналітичні платформи, що поєднують модулі збору даних, аналітичні інструменти, засоби візуалізації та системи прогнозування. Вони дозволяють приймати рішення в реальному часі, аналізувати енергетичні показники за допомогою дашбордів, визначати пріоритети модернізації інфраструктури.

Важливим аспектом є також економічна оцінка якості електропостачання. Вона включає визначення витрат, пов'язаних із втратами енергії, передчасним зносом обладнання, порушенням стабільності мережі. Системи підтримки прийняття рішень дають змогу оцінювати не лише технічні параметри, а й економічні збитки від неякісного енергопостачання, що дозволяє приймати більш обґрунтовані управлінські рішення.

Серед найбільш поширених моделей, що використовуються в енергетичних СППР, можна виділити:

- моделі оптимізації енергоспоживання (лінійне, нелінійне та багатокритеріальне програмування);
- імітаційне моделювання для аналізу сценаріїв розвитку енергосистем;
- нейронні мережі для прогнозування навантаження;
- експертні системи для оцінки технічного стану обладнання та прийняття управлінських рішень.

Розвиток цифрових технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), блокчейну та хмарних обчислень, відкриває нові можливості для створення інтегрованих систем енергоменеджменту. Такі рішення забезпечують прозорість обліку енергоресурсів, безпеку даних і підвищують рівень автоматизації управління.

Таким чином, системи підтримки прийняття рішень у сфері енергоменеджменту є стратегічним інструментом для забезпечення ефективності, надійності та безпеки енергетичних процесів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення математичних моделей, підвищення рівня автоматизації аналізу даних та інтеграцію цифрових технологій у систему управління енергетичними ресурсами.

Висновок. У результаті дослідження встановлено, що системи підтримки прийняття рішень є невід'ємним елементом сучасного енергоменеджменту, який забезпечує підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів та сприяє реалізації принципів сталого розвитку. Застосування моделей і аналітичних інструментів у процесі управління енергетичними системами дозволяє не лише своєчасно виявляти проблеми, а й прогнозувати можливі ризики та формувати оптимальні рішення для їх запобігання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мірошник О.О. Моделі та методи підтримки прийняття рішень в системі керування якістю процесу розподілу електричної енергії. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. (2015). URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/352bf5d1-5a72-49e1-afde-39336d268e46/content

2. Оцінка ризиків при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання / В.А. Степаненко, А.І. Замулко, Ю.А. Веремійчук, В.Ф. Находов // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022.No 2.2 (2022): с. 64-74. URL: http://energy.kpi.ua/article/view/261372

3. Кареєва Н.В., Войтно С.В., Сорокіна Л.В. Ризик-менеджемнт сталого розвитку енергетики: інформаційна підтримка прийняття рішень: навчалоьний посібник/ Н.В. Кареєва, С.В. Войтно, Л.В. Сорокіна. – К.: Альфа Реклама, 2013. – 308 с.

4. Мірошник О. О. Аналіз методів оцінки якості електричної енергії в розподільних мережах в умовах невизначеності. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вип. 175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». 2016. С. 14-16.

УДК 621.3

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КАБЕЛЬНИХ МУФТ ХОЛОДНОЇ УСАДКИ ДЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ТА ЇХ ПЕРЕВАГИ

Бунько В. Я., к.т.н., доц., e-mail: VBunko@gmail.com
Дарморіс П. М., ст. викл., e-mail: darmoris@meta.ua
Кондрат О. Я., асист., e-mail: ficus1985@yahoo.com
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день кабельні муфти є одним із ключових елементів сучасних електроенергетичних систем. Вони класифікуються за типом конструкції, способом монтажу та функціональним призначенням. Особливу увагу привертають муфти, що встановлюються методом холодної усадки, який забезпечує високу надійність з'єднання та спрощує процес монтажу.

Метою дослідження є аналіз конструктивних, технологічних та експлуатаційних особливостей кабельних муфт холодної усадки, а також визначення їх переваг при застосуванні в лініях електропередач середньої напруги.

Основні матеріали досліджень. Муфти холодної усадки використовуються для надійного з'єднання та ремонту силових кабелів у полімерній ізоляції під час монтажу, що забезпечує герметичність та електричну ізоляцію. Вони розтягуються на етапі виробництва і надягаються на кабель за допомогою розтягуючого конуса, який після вилучення призводить до їхньої усадки, створюючи надійне з'єднання.

Активація муфти холодної усадки здійснюється шляхом послідовного виконання технологічних операцій. На початковому етапі ключовою дією є видалення підтримувального корду, який утримує еластичний матеріал муфти у розтягнутому стані. Під час монтажу оператор поступово витягує спіральний або прямолінійний корд із внутрішньої частини компонента (трубки або манжети), унаслідок чого матеріал муфти, завдяки ефекту еластичної пам'яті, відновлює первинну форму та щільно охоплює поверхню кабелю або з'єднання. Такий процес забезпечує герметизацію та електричну ізоляцію з'єднання без застосування відкритого полум'я чи спеціального нагрівального інструменту, що суттєво підвищує безпечність та технологічність монтажу порівняно з термоусадковими аналогами.

У ході дослідження використовувалася кінцева муфта холодної усадки для одножильних кабелів з полімерною ізоляцією типу E3UI(E)RF [1].

Рис. 1 – Система холодної усадки [1]

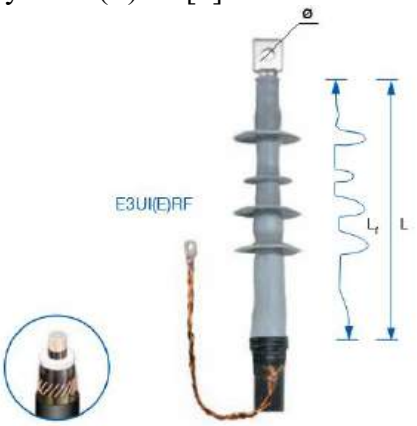


Рис. 2 – Конструкція кінцевої муфти холодної усадки для одножильних кабелів з полімерною ізоляцією [1]

Досліджувана кінцева муфта холодної усадки призначена для окінцювання одножильних кабелів з полімерною ізоляцією марок XnRUHKXS, XRUHAKXS, XRUHKXS, A2XS(F)2Y, N2XS(F)2Y, 2XS(F)2Y, АПвПу2г, ПвП2г, АПвЭгаП та інших аналогічних типів, оснащених мідним дротяним екраном, розрахованих на номінальну напругу 20 кВ [1].

Зовнішній шар муфти, виготовлений із силіконової гуми, характеризується високими діелектричними показниками, стійкістю до трекінгових і ерозійних процесів, а також опором до ультрафіолетового випромінювання. Крім того, матеріал має високу гідрофобність та еластичність, що забезпечує надійну роботу муфти в умовах різних кліматичних і експлуатаційних впливів.

Рисунок 3 – Проведення монтажу та випробування правильності усадки кабельної муфти на штативі

Монтаж кабельної муфти холодної усадки здійснювався у лабораторних умовах із використанням спеціального штатива, що забезпечує фіксацію кабельних зразків у необхідному положенні. Процес складався з послідовних технологічних операцій: підготовки кінців кабелю, встановлення елементів муфти, зняття підтримувального корду та контролю рівномірності усадки еластомерного матеріалу. Після завершення монтажу проводилось випробування правильності усадки муфти, яке включало візуальний огляд герметичності прилягання, перевірку відсутності повітряних порожнин і рівномірність натягу по всій довжині з'єднання. Додатково здійснювалась електрична перевірка опору ізоляції для підтвердження відповідності муфти вимогам експлуатаційної надійності.

Таким чином, улаштування кабельних муфт холодної усадки супроводжується низкою технічних та експлуатаційних переваг [2]: відсутність необхідності застосування відкритого полум'я, нагрівальних пристроїв або спеціального інструменту для усадки; висока термостійкість та надійність роботи при значних коливаннях навантаження і температури; рівномірний розподіл товщини ізоляційного шару по всьому периметру муфти; широкий діапазон робочих температур (від –80 °С до +200 °С); підвищена твердість матеріалу та стійкість до механічного стирання; простота та зручність монтажу, що досягається шляхом видалення спіралеподібного підтримувального корду; забезпечення постійного рівномірного радіального тиску на кабель протягом усього строку експлуатації; швидкість встановлення та адаптивність до широкого діапазону діаметрів кабелів; висока стійкість до озонового старіння та дії ультрафіолетового випромінювання; хімічна стійкість до розчинників і очищувальних засобів, що застосовуються в електротехнічній практиці; висока електроізоляційна здатність як у сухих, так і у вологих умовах експлуатації; еластичність і гнучкість, що дозволяє використовувати муфту на кабелях із різним радіусом вигину; безпечні та нешкідливі умови монтажу і подальшої експлуатації.

Висновок. Отже, застосування кабельних муфт холодної усадки, що відповідають вимогам міжнародних стандартів HD 629.1.S2, IEC 61442, IEC 60502-4, є невід'ємною складовою підвищення ефективності та надійності систем електропостачання. За умови дотримання технології та інструкції з монтажу, використання муфт даного типу забезпечує скорочення часу монтажних робіт, мінімізацію простоїв та, відповідно, зменшення тривалості перерв у електропостачанні споживачів електричної енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Каталог СІКАМ Україна. Кабельні муфти для розподільних електричних мереж. https://sicame.ua/pdf/mufty_sicame_katalog_2021.pdf (дата звернення: 30.10.2025).

2. Гречанюк Б.Я. Муфти гарячої та холодної усадки. https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.16.25.html (дата звернення: 30.10.2025).

УДК 621.3

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ТЕРМІНАЛІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ НОВОГО РІВНЯ

Бунько В. Я., к.т.н., доц., e-mail: VBunko@gmail.com
Глубіш А. С., здобувач вищої освіти, e-mail: anatoliymr3@gmail.com
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»
Бунько Н. В., здобувач вищої освіти, e-mail: bunkonazar@gmail.com
НУ «Львівська політехніка»

Актуальність дослідження. Релейний захист є невід'ємним елементом системи електричної автоматики, який забезпечує надійність, безперервність та безпеку функціонування сучасних енергетичних систем. Основним призначенням релейного захисту є здійснення постійного контролю за станом і режимами роботи елементів енергосистеми, а також оперативне виявлення та відключення пошкоджених ділянок у разі виникнення аварійних або ненормальних режимів.

На сучасному етапі розвитку електроенергетики широкого застосування набули мікропроцесорні пристрої захисту (МПЗ), які поступово замінюють застарілі електромеханічні та мікроелектронні реле. Використання мікропроцесорних технологій не змінює базових принципів побудови релейного захисту та протиаварійної автоматики, однак суттєво розширює їх функціональні можливості. Застосування МПЗ сприяє підвищенню точності та швидкодії захисту, скороченню кількості апаратних компонентів, спрощенню експлуатаційного обслуговування, а також зниженню загальної вартості реалізації захисних систем [1].

Мета дослідження – провести аналіз використання мікропроцесорних терміналів у системі електропостачання з подальшою інтеграцією в технології Smart Grid.

Основні матеріали досліджень. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту (МПЗ) мають низку істотних переваг порівняно з традиційними електромеханічними та мікроелектронними реле, що зумовлює їх широке впровадження в сучасних енергосистемах.

Крім того, значною перевагою є наявність засобів самодіагностики та цифрового обміну даними, що підвищує рівень експлуатаційної надійності і дозволяє інтегрувати МПЗ у системи диспетчерського та автоматизованого управління енергетичними об'єктами (SCADA, АСУТП тощо).

Варто зазначити, що впровадження мікропроцесорних пристроїв релейного захисту сприяє підвищенню ефективності, надійності та інтелектуалізації сучасних систем електропостачання, забезпечуючи високий рівень технічної безпеки та стабільності роботи енергетичних мереж [2].

Найвищий рівень розвитку представляють мікропроцесорні пристрої релейного захисту (МПЗ). Вони реалізують алгоритми захисту у цифровій формі, забезпечуючи високу точність, швидкодію та можливість комплексного аналізу стану енергетичного об'єкта. МПЗ поєднують у собі функції вимірювання, логічного оброблення, реєстрації, контролю та передачі інформації. На відміну від попередніх поколінь, вони здатні взаємодіяти з іншими пристроями через цифрові протоколи зв'язку (наприклад, IEC 61850), що дозволяє інтегрувати їх у системи автоматизованого керування.

Подальший розвиток мікропроцесорних пристроїв релейного захисту (МПЗ) безпосередньо пов'язаний із цифровізацією енергетичних систем та переходом до концепції Smart Grid — інтелектуальних електричних мереж. Сучасні тенденції спрямовані на підвищення рівня інтеграції, автоматизації та взаємодії між усіма елементами енергосистеми, що потребує впровадження нових функціональних можливостей у пристроях захисту.

Рисунок 1 – Структурна схема інтеграції мікропроцесорних терміналів

На сучасному етапі розвитку енергетичних систем мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики виготовляються як провідними міжнародними, так і вітчизняними компаніями. Серед них варто відзначити Siemens, Schneider Electric, Hitachi Energy, General Electric, Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), RZA SYSTEMS та EFACEC, які забезпечують не лише постачання високотехнологічного обладнання, але й надають комплексну технічну підтримку, сервісне обслуговування та спеціалізоване програмне забезпечення для підвищення ефективності експлуатації енергетичних об’єктів.

Важливим аспектом є розвиток комунікаційних можливостей МПЗ. Використання відкритих цифрових протоколів обміну даними, таких як IEC 61850, Modbus TCP/IP, DNP3 тощо, сприяє побудові єдиного інформаційного простору, у якому пристрої релейного захисту, автоматики та диспетчерського управління функціонують у тісній взаємодії. Це дозволяє реалізувати концепцію інтелектуального енергетичного вузла, у якому інформаційні процеси та керування виконуються в автоматизованому режимі.

Окрему увагу приділяють розвитку вбудованих систем самодіагностики та дистанційного моніторингу. Це дає змогу не лише виявляти відмови пристроїв на ранніх етапах, а й планувати технічне обслуговування на основі реального стану обладнання (концепція Predictive Maintenance).

Одним із ключових напрямів розвитку є використання інтелектуальних алгоритмів аналізу даних на основі штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання. Такі алгоритми дозволяють здійснювати прогнозування можливих пошкоджень, аналізувати тенденції зміни параметрів режиму роботи, а також оптимізувати налаштування захистів у реальному часі. Це забезпечує перехід від реактивного принципу захисту до прогностичного (proactive) управління станом електричних мереж.

Аналіз свідчить, що мікропроцесорні пристрої релейного захисту забезпечують суттєве підвищення ефективності, точності та інтелектуального рівня управління системами електропостачання. Вони не лише виконують захисні функції, а й виступають елементами цифрової інфраструктури енергетичних об’єктів, що відповідає сучасним вимогам розвитку Smart Grid-технологій.

Висновок. Таким чином, перспективи розвитку мікропроцесорних систем релейного захисту пов’язані з підвищенням їх інтелектуалізації, комунікаційної взаємодії та автономності. У комплексі це сприятиме створенню цифрових енергетичних систем нового покоління, здатних забезпечити високу надійність, гнучкість та ефективність функціонування електроенергетичних мереж.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пустовіт Д. П., Фурман А. С., Тиднюк І. Ю., Паламарчук К. Х.. Особливості застосування мікропроцесорного релейного захисту. https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/viewFile/21598/17856 (дата звернення: 26.10.2025)

2. Гребченко М. В., Нікіфоров А. П., Бунько В. Я. Релейний захист і автоматика розподільних електричних мереж. Частина 1. Навчальний посібник. Київ, ЦП «КОМПРИНТ». 2019. 314 с.

УДК 621.313.3

КОМПЕНСАЦІЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ МЕРЕЖІ У ТРИФАЗНІЙ СИСТЕМІ ШЛЯХОМ ШТУЧНОЇ НЕСИМЕТРІЇ В ТОЧКАХ ПРИЄДНАННЯ СПОЖИВАЧА

Вовк О. Ю., к.т.н., доц., e-mail: Oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність досліджень. Покращення роботи споживачів в умовах несиметріїї напруг мережі розглядається у багатьох роботах. Одним з підходів такого покращення є балансування однофазних навантажень шляхом їх динамічних перемикань між живлячими проводами трифазної системи. Такі перемикання відбуваються за відповідними алгоритмами, які враховують режими роботи навантажень. Вони призводять до зменшення сил струмів нейтралі майже на 90 %, але для реалізації потребують додаткової контрольної і комутаційної апаратури або симетруючих трансформаторів. Наступний підхід передбачає використання установок компенсації реактивної потужності, які встановлюються у відповідних точках трифазної системи з урахуванням виду і потужності навантажень. Вони забезпечують не тільки компенсацію споживання реактивної потужності, а й знижують дисбаланс фазних напруг навантаження внаслідок зниження струмів нульової і зворотної послідовностей. Застосовують цей напрям для випадків постійного рівня несиметрії у часі. Для компенсації несиметрії напруг мережі також використовують динамічні відновлювачі напруги, за допомогою яких можна майже повністю нівелювати несиметрію напруг. Проте вартість технічної реалізації такого покращення є значною. Крім того, можуть бути задіяні системи керування живлячою напругою навантажень на базі силових тиристорів, що вирівнюють діючі значення фазних напруг за найменшим значенням напруги. Проте це обумовлює певний провалу напруги і видає на виході напругу з деякими гармонічними складовими. Отже випливає, що існуючі підходи компенсації несиметрії напруг мережі, як правило, спрямовані на групу навантажень і мають значну вартість технічної реалізації [1–4].

Мета дослідження. Тому метою дослідження є обґрунтування способу компенсації несиметрії напруг мережі, який має просту технічну реалізацію за її незначної вартості.

Основні матеріали досліджень. Для досягнення поставленої мети було розглянуто трифазну систему з несиметричним джерелом і симетричним навантаженням та проаналізовано декілька варіантів її роботи. При цьому прийнято, що значення електрорушійних сил джерела і опорів навантаження у всіх варіантах є незмінними. Як критерій оцінки режиму роботи навантаження обрано його напругу зворотної послідовності. Для аналізу застосовано символічний (комплексний) метод і метод симетричних складових.

У першому варіанті джерело і навантаження з’єднані зіркою, лінія – ідеальна трипровідна. У другому варіанті джерело і навантаження з’єднані зіркою, лінія – чотирипровідна (лінійні проводи – ідеальні, нейтральний провід – реальний). У третьому варіанті джерело з’єднане зіркою, навантаження – трикутником, лінія – ідеальна трипровідна, у лінію увімкнені струмообмежувальні елементи з однаковими опорами. Дослідження показало, що у всіх цих трьох випадках напруга зворотної послідовності майже однакова. Тобто перехід від одного традиційного схемного рішення трифазної системи до іншого без застосування додаткових пристроїв для компенсації несиметрії наруги джерела не призводить до зменшення напруги зворотної послідовності.

У четвертому варіанті джерело і навантаження з’єднані зіркою, лінія – ідеальна трипровідна, у лінію увімкнені симетруючі пристрої з різними опорами (рис. 1).

На рис. 1 позначено: $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$ – комплекси е.р.с. джерела; $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ – комплекси струмів кола; $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$ – комплекси фазних напруг навантаження; $Z_н$ – комплекс повного опору фази навантаження; $\dot{U}_N$ – комплекс напруги зміщення нейтралі; $Z_{сим(A)}$, $Z_{сим(B)}$, $Z_{сим(C)}$ – комплекси повних опорів симетруючих пристроїв.

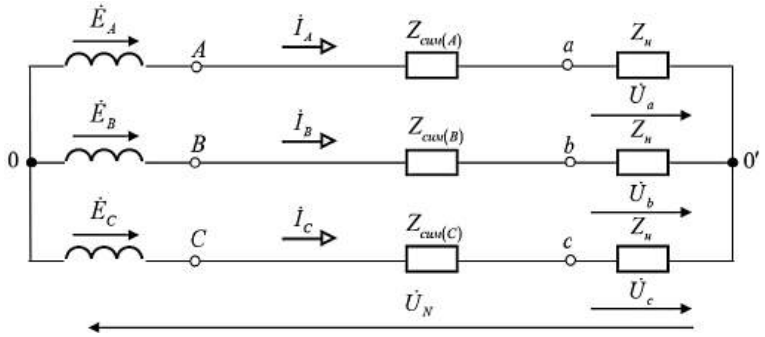


Рисунок 1 – Розрахункова схема трифазної системи з симетруючими пристроями

У результаті аналізу кола, наведеного на рис. 1, отримано вирази комплексів повних опорів симетруючих пристроїв, за яких комплекси фазних напруг навантаження є симетричними і номінальними:

$$Z_{сим(A)} = \left(\dot{E}_A / \dot{E}_{A(н)} - 1\right) \cdot Z_н ; \quad Z_{сим(B)} = \left(\dot{E}_B / \dot{E}_{B(н)} - 1\right) \cdot Z_н ; \quad Z_{сим(C)} = \left(\dot{E}_C / \dot{E}_{C(н)} - 1\right) \cdot Z_н , \quad (1)$$

де $\dot{E}_{A(н)}$, $\dot{E}_{B(н)}$, $\dot{E}_{C(н)}$ – комплекси номінальних е.р.с. джерела.

Підстановка чисельних значень у (1) показала, що для створення симетричних і номінальних напруг навантаження необхідно, щоб модуль куту зсуву фаз опорів окремих симетруючих пристроїв був більшим за 90°. На практиці таке значення куту зсуву фаз не можливо створити за рахунок елементів з активним, індуктивним і ємнісним опорами. Тому запропоновано виконувати симетрування напруг навантаження за найменшим значенням е.р.с. джерела. Тоді для випадку, коли найменше значення е.р.с. спостерігається у фазі А джерела, вирази (1) будуть мати вигляд:

$$Z_{сим(A)} = 0 ; \qquad Z_{сим(B)} = \frac{\dot{E}_B - \dot{E}_A \cdot e^{-j120^\circ}}{\dot{E}_A \cdot e^{-j120^\circ}} \cdot Z_н ; \qquad Z_{сим(C)} = \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_A \cdot e^{-j240^\circ}}{\dot{E}_A \cdot e^{-j240^\circ}} \cdot Z_н . \qquad (2)$$

Як показали чисельні дослідження, у такому випадку модуль куту зсуву фаз опорів окремих симетруючих пристроїв має бути меншим за 90°, тому симетруючі пристрої можуть бути реалізовані за допомогою елементів з активним, індуктивним і ємнісним опорами. Запропонований спосіб симетрування напруг трифазного навантаження на відміну від існуючих є простішим, дешевшим і має індивідуальний характер.

Висновок. У роботі доведено, що у трифазній системі з несиметричним джерелом і симетричним навантаженням можна компенсувати дію несиметричної напруги джерела для навантаження. Така компенсація можлива шляхом симетрування напруг навантаження за найменшим значенням електрорушійної сили джерела. Для цього у лінійні проводи потрібно включити симетруючі пристрої, які не є джерелами і мають активний та реактивний опори.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Grigoraș G., Neagu B-C., Gavrilaș M., Triștiu I., Bulac C. Optimal Phase Load Balancing in Low Voltage Distribution Networks Using a Smart Meter Data-Based Algorithm. *Mathematics*, 2020, 8(4), P. 549, https://doi.org/10.3390/math8040549

2. Вовк О.Ю., Квітка С.О., Попова І.О., Діордієв В.Т. Збереження роботоздатності трифазного статичного навантаження за неповнофазного живлення. *Праці ТДАТУ*, 2024, 24(1), С. 136-150, https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-10

3. Czarnecki L., Almousa M. Adaptive Balancing by Reactive Compensators of Three-Phase Linear Loads Supplied by Nonsinusoidal Voltage from Four-Wire Lines. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, 10(3), P. 32-42, https://doi.org/10.11648/j.epes.20211003.11

4. Попова І.О., Квітка С.О., Вовк О.Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження. *Праці ТДАТУ*, 2023, 23(1), С. 179-187, https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187

УДК 621.4

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ НА ПРИРОДНОМУ ГАЗІ ДЛЯ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В МЕДИЧНИХ УСТАНОВАХ

Горюн О. О., асп.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Галько Т. І., ст. викл.
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Старенький В. П., проф.
Державна установа «Інститут медичної радіології та онкології ім. С. П. Григор'єва Національної академії медичних наук України»
Карпалюк І. Т., проф., e-mail: humpway@gmail.com
Інститут загальної енергетики НАН України

Актуальність дослідження. Під час обстрілів енергетичної системи України, з'являється необхідність забезпечення електричкою важливих комунальних об'єктів, до яких відносять медичні установи різного призначення. Найбільш розповсюджене рішення, щодо джерела резервного живлення досі залишається генератор на двигуні внутрішнього згоряння. Так, за даними різних ресурсів в Україну завезена значна кількість генераторів [1, 2]. За даними [2], 2021 рік 68 тис. од., 2022 рік 643 тис. од., 2023 рік 669 тис. од., за 1 квартал 2024 року 29 тис. од.

Мета дослідження – простежити причини поширення генераторів на двигунах внутрішнього згоряння в медичних закладах і їх вплив на електричну мережу

Основні матеріали. Можливість автономно вирішити питання електропостачання дуже приваблива для домогосподарств і малих бізнесів. Особливо це важливо для підприємств, для яких перерва в електропостачанні може призвести до погіршення здоров'я або навіть загибелі людей. Перша категорія електроспоживачів за ПУЕ. І мова йде саме про заклади медичного обслуговування. В таких закладах в залежності від місця розташування, займаємої площі, призначення медичного закладу використовують різні за потужністю генератори. Є і переносні генератори, і генератори переносні, що встановлені в постійні спеціально призначені місця і є навіть стаціонарні, що встановлені на спеціально облаштованих площадках. Але тим не менш всі такі генератори потребують рідкого палива. Звісно, що для живлення таких генераторів необхідно мати певні запаси палива. Для зберігання бензину для генераторів, потрібно виконання певних норм протипожежної безпеки. Для таких місць зберігання має бути з одного боку вільний доступ персоналу, а з іншого боку унеможливлення потрапляння вогню. До того ж потрібно провести навчання персоналу, при поводженні дій із бензином. Хтось має стежити за рівнем палива в паливному баку генератора. Ще бензин є дорогим паливом.

Під час відсутності електричної енергії в мережі, використання резервного генератора для медичних об'єктів може вирішити питання життя. Проте вартість однієї виробленої кіловат години може становити значну величину. Вартість однієї кіловат-години електроенергії, виробленої бензиновим генератором, напряму залежить від споживання палива генератором і вартості бензину. Популярні побутові бензинові генератори потужністю до 5 кВт споживають приблизно 1,7 літра бензину за годину роботи. За середньої ціни бензину близько 55 грн за літр це приблизно 93,5 грн витрат на пальне за годину роботи генератора. Якщо генератор працює під середнім навантаженням, наприклад 3 кВт, вартість 1 кВт·год електроенергії буде приблизно такою: 93,5 грн / 3 кВт = 31,2 грн за 1 кВт·год [3, 4]. Для порівняння, ціна 1 кВт·год електроенергії для домогосподарств в Україні у 2025 році становить приблизно 4,32 грн [5]. Таким чином, бензинові генератори ефективні як резервні джерела енергії, але коштують суттєво дорожче за централізоване електропостачання.

Для зменшення ціни кіловат-години, виробленої резервним генератором, було знайдене наступне рішення: використовувати в якості палива природний газ. Промисловість відразу відреагувала на запит. В Україні вже є в продажу такі генератори, які налаштовані на споживання природного газу, а також газової суміші метан-пропан, що закачується в побутові газові балони [6]. Конкретний приклад такого генератора: Start Pro SPG-3500 +газовий комплект (гарантія 3 роки) 3/3.2кВт – 12550 грн. Спеціалісти з експлуатації двигунів внутрішнього згорання доводять, що переобладнати двигун з рідкого палива на газові суміші можливо. Але виробники вже доклали зусиль і зробили це самі. Споживачу не потрібно нічого додатково налаштовувати тільки придбати і встановити такий генератор. Причому вартість такого генератора мало відрізняється від вартості суто бензинової версії.

У 2025 році середня ціна газу для населення в Україні коливається приблизно від 2 грн до 8 грн за кубічний метр, причому середні значення близько 7,99 грн за куб. м (вартість залежить від регіону та постачальника) [7].

Базуючись на характеристиках типового газового генератора, він споживає приблизно 0,32–0,4 кубометра газу за годину при номінальній потужності близько 3–4 кВт. Виходячи з середньої ціни газу 8 грн за кубометр, вартість палива на годину роботи складає приблизно від 2,56 грн до 3,2 грн. Якщо розділити вартість спожитого газу на вироблену електроенергію (припустимо 3,5 кВт середнього навантаження генератора), отримаємо вартість 1 кВт·год:

3 грн / 3,5 кВт ≈ 0,86 грн/кВт*год 3,5 кВт3 грн≈0,86 грн/кВт*год.

Це лише вартість палива – до неї потрібно додати амортизацію генератора та експлуатаційні витрати, але паливна складова, яка найбільше впливає на собівартість, є істотно нижчою за вартість кіловат-години, виробленої бензиновим генератором (приблизно 31 грн/кВт·год). Для порівняння, середня ціна електроенергії для населення – близько 4,32 грн/кВт·год. Отже, електроенергія від газового генератора коштує значно дешевше, ніж від бензинового генератора – приблизно від 0,8 до 1,2 грн за кВт·год лише за паливо. Це робить газові генератори економічно більш вигідними при резервному або основному живленні, особливо у випадках довготривалої роботи.

Звісно, що при використанні генераторів на газовому пальному є і побічний ефект. І нас в досліджені цікавив саме електричний ефект. Генератори на газовому пальному мають меншу потужність, менший крутний момент. Тому генеруючі можливості також будуть зменшені. Це проявляється у послабленні навантажувальної кривої. Генератор не витягує різкі стрибки в мережі, а це пуски асинхронних двигунів, запуск різних агрегатів, приладів.

Висновок. При підключенні в мережу резервного генератора на газовому паливі, необхідно: виконати підготовчі роботи з урахуванням якості електричної енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Україна імпортувала у 2022 році майже 670 тис. генераторів. Режим доступу: https://ua-energy.org/uk/posts/ukraina-importuvala-u-2022-rotsi-maizhe-670-tys-heneratoriv

2. Велика війна: в Україну вже ввезено 1,3 млн електрогенераторів. Режим доступу: https://skilky-skilky.info/velyka-viyna-v-ukrainu-vzhe-vvezeno-1-3-mln-elektroheneratoriv/

3. Скільки бензину споживає генератор за годину? Режим доступу: https://vinur.com.ua/ua/aboutus/usefull-info/articles/skilky-benzynu-spozhyvaye-generator-za-godynu

4. Калькулятор вартості електроенергії від мотогенератора. Режим доступу: https://komcat.net.ua/manual/motopower.html

5. Тариф на електроенергію для населення залишиться незмінним до 31 жовтня 2025 року. Режим доступу: https://tolk.ua/ua/tarif-na-elektroenergiyu-dlya-naselennya-zalishitsya-nezminnim-do-31-zhovtnya-2025-roku/

6. Газові генератори: екологічність та ефективність. Режим доступу: https://lodka5.com.ua/ua/blog/gazovie-generatori-jekologichnost-jeffektivnost/

7. Тарифи на газ для населення 2025 р. Режим доступу: https://tariffa.com.ua/tarif-na-gaz

УДК 621.57:658.26

ЕКОНОМІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ КОРИСТУВАННІ ХОЛОДИЛЬНОЮ ТЕХНІКОЮ

Гурна І. І., викл., e-mail: aaaa222288g@gmail.com
ДНЗ «Лісоводський ПАЛ»
Мірошник О. О., д.т.н., проф.
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день питання впровадження енергозберігаючих практик, тому олодильник — єдиний побутовий прилад, який працює цілодобово протягом усього року. Скільки споживає холодильник електроенергії, напряму впливає на сімейний бюджет, адже цей пристрій може складати до 30% від загального споживання електрики в домі. З усієї домашньої техніки найбільш енерговитратною є холодильник. При цілодобовому функціонуванні навіть TV і обігрівач не поступаються йому за кількістю намотуваних кіловатів. Так скільки ж кіловат споживає холодильник на місяць? Як мінімізувати показник електроенергії стосовно цього обладнання і знизити енерговитрати? Про все послідовно.

Мета дослідження. В Україні, як і в інших країнах, стан впровадження заходів з енергозбереження є вкрай недостатнім, тому практичні кроки у напрямі енергозбереження скоріше є підтвердження культури та високого рівня свідомості суспільства.

Основні чинники енерговитрат. Холодильник, залежно від класу та умов експлуатації, може витрачати на рік від 210 до 470 КВт/год. За добу сумарний показник дорівнює від 570 Вт до 1,28 КВт/год. Фактори енерговитрат: величина завантаження камер (як багато продуктів зберігається всередині); зовнішня температура; як часто відкривають двері обладнання; частота розморожування.

Зменшення споживання своїми силами. Купивши у квартиру або будинок сучасний холодильний агрегат Gorenje або іншого бренду, можна знизити його енергоспоживання ще, як мінімум, на 10–15%.

Що ж можна зробити своїми руками для економії рахунків за електрику?

Уникати відкривання дверцят холодильника без необхідності. Взяти за звичку відчиняти холодильну камеру тільки тоді, коли потрібно взяти або покласти продукти.

Ніколи не класти в холодильник гарячі або теплі страви. Це порушує роботу конденсатора, є вірогідність передчасно вивести з ладу обладнання.

Вкрай не рекомендується зберігати в холодильній камері відкриті рідини (не накриті кришкою). Це збільшує вологість і несприятливо позначається на роботі обладнання.

Не варто виставляти на регуляторі температури мінімальні показники. Краще вибрати щось середнє. Від цього може залежати витрата електроенергії. Регулярно робити розморожування. Щоб визначити, скільки кВт споживає холодильник, можна почати з інформації в технічному паспорті до обладнання. Високий клас енергоспоживання — найкращий вибір при купівлі установки. Витратити фінанси з сімейного бюджету один раз вигідніше, ніж щомісяця переплачувати за комуналку. Також, щоб уникнути величезних сум за електрику, потрібно дотримуватися перерахованих вище рекомендацій.

Пояснення енергоефективності. Сучасне маркування. З 2021 року діє нова система маркування від A до G, де A — найекономніший клас. Стара система з класами A+++, A++, A+ поступово виходить з обігу, але ще зустрічається на деяких моделях.

Річне споживання на етикетці. На енергетичній етикетці кожного холодильника вказано річне споживання у кВт·год. Ця цифра розрахована для стандартних умов експлуатації та дає найточніше уявлення про реальні витрати електроенергії. Клас A споживає зазвичай 150–250 кВт·год на рік, клас B — 250–300 кВт·год, клас C — 300–400 кВт·год. Але насправді, кількість спожитої електроенергії залежить від конкретної моделі. Скільки Ват споживає холодильник у режимі роботи компресора – від 100 до 600 Вт залежно від моделі. Пікова потужність холодильника може досягати 500–800 Вт під час запуску компресора.

В Україні вартість 1 кВт/година для населення складає 4,32 грн. Тобто холодильник потужністю 120 кВт/год витрачає 518,40 грн на рік. Потужність 320 кВт/год коштує 1382,4 грн. А за холодильник з витратою 600 кВт/годин на рік заплатите 2592 грн за електроенергію. Скільки споживає холодильник в годину розрахувати важко, бо компресор не працює постійно. А от приблизно порахувати скільки електроенергії споживає холодильник у місць можливо: розділіть споживання вашого холодильника за рік на 12 місяців. Щоб дізнатись скільки кВт споживає холодильник саме вашої моделі, подивіться на етикетку (може бути на стінці всередині) або на сайті виробника. Втім, варто пам'ятати, що це лише приблизне значення. Фактичне споживання електроенергії залежить від багатьох факторів.

Висновок. Холодильник справді один з найбільш енергоактивних приладів у домі через постійну роботу 365 днів на рік. Правильний вибір класу енергоефективності може заощадити сотні гривень щорічно на оплаті електроенергії. При виборі нової моделі орієнтуйтеся на етикетку енергоефективності та річне споживання у кВт·год. Інвестиції в енергоефективний холодильник класу А окупляться протягом кількох років шляхом зменшених витрат на електрику. Іноді вигідніше купити новий економний холодильник, ніж продовжувати платити високі рахунки за електроенергію через експлуатацію старої енергозатратної моделі. Сучасні технології дозволяють отримати більший об'єм, кращу функціональність та менше споживання одночасно.

Зниження витрат електроенергії в холодильних системах є важливим завданням для багатьох підприємств харчової промисловості, які прагнуть зниження витрат, збільшення прибутку, а також зменшення впливу на навколишнє середовище. Тема набула актуальності ще більше у сьогоднішніх реаліях, коли доводиться заощаджувати енергоресурси. У цій статті ми розглянемо основні способи підвищення енергоефективності холодильних систем та розповімо, як витрати на холод можна перетворити на прибуток. Правильний вибір обладнання. Енергоефективні моделі. Підбір промислового холодильного обладнання на сьогоднішній день, мабуть, один з найважливіших етапів при побудові енергоефективної холодильної системи. Перед тим, як купити холодильне обладнання, треба орієнтуватися не тільки на ціну, а й враховувати вартість експлуатації. З цією проблемою часто стикаються підприємства, що купують холодильне обладнання б/в, або коли заощадили в ціні агрегатів, але зазнали величезних витрат при постійних ремонтах і великих втрат електроенергії.

Аналогічна ситуація виникає при купівлі більш дешевих аналогів, коли виробники холодильного обладнання ставлять найдешевші комплектуючі, роблячи ціну холодильного агрегату низькою. Так, ви отримаєте економію на старті, але про жодну ефективність подібного обладнання не може бути й мови, тому в результаті ви несете додаткові витрати в процесі експлуатації, що зводить вашу економію нанівець. Саме тому купити холодильне обладнання від перевіреного виробника – найкраще рішення, якщо ви дійсно хочете заощаджувати. Купуючи надійне енергоефективне обладнання, ви отримуєте холодильні агрегати з вбудованою системою енергозбереження, виготовлені з комплектуючих найвищої якості від лідерів ринку промхолоду, які в процесі експлуатації заощадять вам чимало коштів.

Відповідність розмірів та потужності. Важливо вибирати обладнання, яке відповідає необхідним обсягам зберігання. Буває так, що підприємство купує універсальний варіант, із «запасом потужності», не вникаючи у перераховані вище аспекти. Це серйозна помилка, що веде до додаткових витрат електроенергії. Саме тому краще ретельно та уважно підходити до підбору обладнання, або ви можете довірити це професіоналам.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів: Навч. посіб. / М. М. Масліков – К.: НУХТ, 2007. – 335 с.

2. Холодильні установки: Підручник / 6-те вид., переробл. і доп. / І. Г. Чумак, В. П. Чепурненко, С. Ю. Лар'яновський та ін.; За ред. І. Г. Чумака. – Одеса: Рефпринтінфо, 2006. – 550 с.

3. Н. П. Саєнко, Т. Д. Волошенко «Устаткування підприємств громадського харчування» Київ «ЛДЛ» 2005. 314с.

УДК 621.4

ПРОБЛЕМИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ НАЯВНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ОДНОФАЗНИХ СПОЖИВАЧІВ

Дегтяр Я. Д., асп.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Зеленков Д. М., асп.
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Карпалюк І. Т., проф., e-mail: humpway@gmail.com
Інститут загальної енергетики НАН України

Актуальність дослідження. В Україні зростає потреба в альтернативних джерелах електричної енергії. Згідно джерелу [1], розповсюдження СЕС по території України не рівномірне (рис. 1). З іншого боку динаміка встановлення сертифікованих СЕС показала, що найбільша кількість таких станцій була впроваджена в 2019 році (рис. 2).

Рисунок 1 - Близько половини українських СЕС розташовані у шести областях.
Джерело: Energy Map

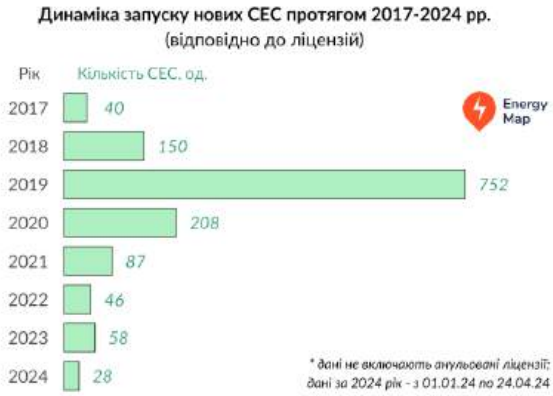


Рисунок 2 - Динаміка вводу нових сонячних об'єктів показала, що 2019-й став піковим за дев'ять років.
Джерело: Energy Map

Статистика не приводить даних по самовстановлених СЕС, які не мають підключення до загальної мережі. Загальна потужність таких СЕС не може бути визначена, тому, що вони постійно підключаються, відключаються або просто не експлуатуються. Розповсюдженість таких «домашніх» СЕС має дві причини: перша це необхідність в енергії під час війни; друга причина це отримання економії на коштах при споживанні електричної енергії, яка має тенденцію до зростання. І все ж таки, основна причина появи таких «домашніх» СЕС, це значне зниження ціни на СЕС і на комплектуючі до них. Можна прослідкувати ціни на станцію потужністю 10 кВт:

За даними [2] у 2014 року встановлення сонячної станції потужністю 10 кВт «під ключ» обходилося приблизно в 743000 грн. У 2020 року ціни впали майже на третину до 412750–495300 грн за таку ж потужність. У 2023–2024 роках вартість становили 247000–330000 грн. У 2025 році станція на 10 кВт може вартувати від 247650 до 371475 грн [2].

Але ціни зменшилися не тільки на готові під ключ СЕС, але значно знизилися ціни на комплектуючі до них.

Якщо ціна на сонячні панелі п'ять років назад була значною для домогосподарств, то зараз на ринку можна знайти нові панелі і бувші у використанні за цінами, що стали доступними для багатьох.

Так, нова сонячна панель: Двостороння сонячна панель Longi Solar LR8-48HGD-440M (440 Вт) чорна рама має вартість 2863 грн [3]. Або, наприклад, сонячні панелі, що були у використанні, Trina Solar TSM-225PC05 – 225 Вт полікристал. Прямий імпорт із Німеччини. Була оцінена в 1100 грн [4].

Що стосується інших комплектуючих СЕС то найбільш важливий елемент – це інвертор: Гібридний сонячний інвертор (ДБЖ) LPW-HY-1000VA (1000Вт) 12V 40A MPPT 20-150V OFF GRID має ціну: 8636 грн [5].

Мережевий інвертор Afore BNT003KTL 3кВт має ціну: 17653 грн [6].

Інші комплектуючі: кабелі, конектори, кабель канали, кріплення та інше для «домашніх» СЕС використовуються найдешевші або навіть їх замінники. Тому що такі СЕС не будуть доведені до сертифікації і відповідати вимогам їм не потрібно. Ось чому такі «домашні» СЕС отримали широке розповсюдження.

Мета дослідження – визначити причини погіршення обліку електроенергії в електричних мережах невеликих поселень.

Основні матеріали досліджень. Для електроенергетичної системи, саме «домашні» СЕС становлять певні проблеми. Проявляються вони в самовільному відключенні споживача від мережі в періоди часу, на які розраховує система. Причому відключення проходить випадковим чином. А за рахунок широкого розповсюдження, такі хаотичні відключення, а потім дружні включення призводять до появи порушення симетрії в трифазній мережі.

Саме на виникненні несиметрії за рахунок використання «домашніх» СЕС були зосереджені наші дослідження. Такі явища призводять до проблем із обрахуванням електричної енергії трифазними приладами обліку.

Відповідно до норм, що регламентують точність приладів обліку, записані різні фактори що змінюють точність показань приладів обліку. До них відносять фактори зовнішнього внутрішнього впливу. До внутрішніх відносять наступні: асиметрія напруги, гармонічні складники у колах напруги та струму, постійний струм та парні гармоніки у колі змінного струму, непрані гармоніки у колі змінного струму, субгармоніки у колі змінного струму. Всі ці фактори і є факторами наслідками використання інверторів малих СЕС. Вимірювання показників якості електричної енергії для вулиці поселення із приватними будинками, показало наявність всіх зазначених завад. З точки хору дослідження такий стан призводить до появи втрат електричної енергії, а також погіршення обліку.

Висновок. У результаті проведених досліджень, було виявлено причини погіршення обліку електричної енергії внаслідок погіршення якості електричної енергії в тому числі несиметричних режимів в трифазних мережах, що були викликані наявністю «домашніх» СЕС. Запропоновано заходи по обрахуванню електричної енергії при наявності несиметричних режимів в трифазних мережах за рахунок встановлення приладів обліку із АСКУЕ для можливості використання програмних засобів для визначення наявності несиметричних режимів і проведення коригуючих обрахунків. Що зможе призвести до покращення результатів обліку без встановлення дороговартісних компенсаторів несиметричних режимів

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Білозерова Л. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об’єктів. Режим доступу: https://ua-energy.org/uk/posts/tryfonivska-ses-foto-dtek

2 Встановлення сонячних панелей: Актуальні ціни 2025. Режим доступу https://oc.com.ua/vstanovlennia-soniachnykh-panelei-aktualni-tsiny-2025/

3. https://solar-tech.com.ua/ua/solar-electricity/solar-panels/fvustoronnyaya-solnechnaya-panel-longi-solar-lr8-48hgd-440m-440-vt-.html

4. https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/b-u-sonyachn-panel-solnechnye-paneli-trina-solar-225-vt-245-vt-IDYzrsQ.html

5. https://energo-partner.com.ua/ua/p1762580925-solnechnyj-invertor-3000vt.html

6. https://alfa.solar/uk/merezhevij-invertor-afore-bnt003ktl-3kvt-id858.html

УДК 621.3.031

ПРОГНОЗУВАННЯ ТОВЩИНИ ВІДКЛАДЕННЯ ОЖЕЛЕДІ НА ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Єрмак Д. А., асп., e-mail: Golf9292ua@gmail.com
Савченко О. А., к.т.н., доц., e-mail: savoa@btu.kharkiv.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Утворення льоду на лініях електропередач відбувається внаслідок замерзання крапель води на поверхні провідників при підвищенні рівня вологості в атмосфері до критичних показників. Накопичення льодових відкладень може спричинити вібрацію та механічне пошкодження ліній, що становить серйозну загрозу для стабільного функціонування електромережі. Сучасні методи прогнозування процесу обледеніння умовно розподіляються на два напрямки: моделі, засновані на фізико-математичних законах, та моделі статистичного аналізу. В даному дослідженні проведено вивчення ефективності одного з методів статистичного аналізу, а саме комбінованого алгоритму ISSA-CNN-LSTM.

Мета дослідження – розробка методу для прогнозування товщини відкладення ожеледі на проводах ПЛ на основі комбінованого алгоритму ISSA-CNN-LSTM.

Основні матеріали досліджень. Алгоритм SSA, запропонований Xue зі співавторами [1], імітує природну поведінку птахів під час добування їжі та захисту від хижаків для досягнення оптимальних результатів. У структурі алгоритму виділяють три типи агентів: дослідники, які слідують, та спостерігачі. Дослідниками стають особини з найкращими показниками пристосованості, інші виконують роль тих, хто слідує за ними, а частина з них призначається спостерігачами для моніторингу та сигналізації про загрози. При виявленні небезпеки популяція відмовляється від знайденого ресурсу і мігрує до захищеної зони. Найбільш адаптовані дослідники здатні ефективно локалізувати джерела їжі, а також визначають траєкторію руху всієї групи. Відповідно, дослідники відповідають за виявлення та ідентифікацію харчових ресурсів у межах встановленої зони пошуку.

Класична версія алгоритму SSA формує початкову популяцію випадковим чином. Проте якість початкового розподілу особин суттєво впливає на швидкість та точність досягнення оптимального рішення. У роботі [2] застосовано експоненціально-логістично-модульне хаотичне відображення для генерації вихідної популяції в моделях SSA, що забезпечує збалансоване поєднання рівномірного покриття простору пошуку та різноманітності агентів, покращуючи адаптаційні властивості початкової конфігурації. Дане відображення формує рівномірно розподілену хаотичну послідовність елементів у межах інтервалу [1,45÷4] та характеризується високою швидкістю обчислення ітерацій.

Концепцію згорткових нейронних мереж (CNN) представили LeCun із колективом авторів [3] як архітектуру прямого розповсюдження сигналу з операціями згортки та багаторівневою структурою для аналізу візуальної інформації. Ключовою відмінністю CNN від класичних мереж із зворотним розповсюдженням помилки є застосування принципів локального сприйняття та спільного використання параметрів, що забезпечує ефективне вилучення характеристик безпосередньо з вихідних даних та їх багатовимірне представлення при суттєвому скороченні обчислювальної складності. Архітектура CNN складається з трьох основних компонентів: згорткового шару, шару підвибірки та повнозв'язного шару. На початковому етапі згорткові операції виділяють характерні ознаки з даних; далі шар підвибірки агрегує ці ознаки, зберігаючи ключову інформацію при зменшенні просторової розмірності. Завершальний повнозв'язний шар інтегрує всі елементи з попереднього рівня для формування фінального виходу характеристик.

При обробці протяжних послідовностей класичні рекурентні нейронні мережі (RNN) стикаються з проблемами затухання або експоненційного зростання градієнтів. Для усунення цих недоліків Хохрайтер [4] у 1997 році представив архітектуру LSTM (довгої короткочасної пам'яті). LSTM є модифікацією базової RNN-моделі, яка успадковує структуру прихованих

шарів, але при цьому здатна ефективно утримувати інформацію з віддалених часових кроків. Функціонування LSTM забезпечується трьома ключовими механізмами: вхідним вентилем (gate), який контролює надходження нової інформації, вихідним вентилем для регулювання виведення даних, та вентилем забування, що визначає, яку інформацію слід відкинути.

У даному дослідженні проведено аналіз інформації, отриманої від системи моніторингу обледеніння на лінії електропередач напругою 35 кВ. Загальний масив складається з 1000 записів спостережень, які розподілено між навчальною, валідаційною та тестовою вибірками у пропорції 8:1:1. З метою оптимізації обчислень та забезпечення порівнянності різнорідних параметрів застосовано процедуру нормалізації, яка масштабує всі значення до інтервалу [0, 1].

Поєднання перерахованих вище методів дозволило запропонувати комбінований алгоритм для прогнозування товщини відкладення ожеледі на проводах ПЛ. На початковому етапі дані про обледеніння ліній електропередач пройшли попередню обробку з метою підвищення якості прогнозних оцінок. Далі до трансформованих даних застосовано згорткові нейронні мережі (CNN) для виділення ключових характеристик, що дозволило спростити структуру вхідної інформації та поліпшити прогнозні показники. Оскільки спостереження за утворенням льоду на повітряних лініях відбувається в ускладнених умовах, обсяг наявних даних є обмеженим для побудови надійних моделей. Для розв'язання цієї проблеми в роботі застосовано регресійну архітектуру на основі LSTM. З метою оптимізації налаштувань моделі LSTM використано удосконалений алгоритм ISSA, який автоматично підбирає оптимальну кількість нейронів, початковий темп навчання та параметр регуляризації.

Для верифікації ефективності розробленої моделі прогнозування обледеніння в якості базових використано моделі SSA-CNN-LSTM та CNN-LSTM. Аналіз результатів свідчить, що прогнози базових моделей SSA-CNN-LSTM і CNN-LSTM демонструють суттєві відхилення від фактичних спостережень, тоді як запропонована модель ISSA-CNN-LSTM забезпечує прогнозні оцінки, що максимально наближені до реальних показників. Для кількісного оцінювання якості трьох варіантів прогнозування застосовано метрики середньоквадратичної похибки (MSE) та середньої абсолютної похибки (MAE). Так, наприклад, прогнозування на відібраних тестових даних для методів SSA-CNN-LSTM та CNN-LSTM дало показник MSE відповідно 0,89 та 1,12, тоді як для запропонованої моделі ISSA-CNN-LSTM MSE склала 0,31.

Висновок. Запропоновано метод для прогнозування товщини відкладення ожеледі на проводах ПЛ на основі комбінованого алгоритму ISSA-CNN-LSTM, який дозволяє суттєво покращити точність прогнозування в порівнянні з базовими алгоритмами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Xue J, Shen B. (2020) A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorith m. Systems ence & Control Engineering an Open Access Journal, 8: 22-34. DOI:10.1080/21 642583.2019.1708830.

2. Lin C, Liang H, Pang A. (2023) A fast data-driven optimization method of multi-area combined economic emission dispatch. Applied Energy, 337: 120884. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120884

3. LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. (1998) Gradient-based learning applied to document recognit ion[J]. Proceedings of the IEEE, 86(11): 2278-2324. DOI:10.1109/5.726791.

4. Hochreiter S., Schmidhuber J. (1997) Long Short-Term Memory, in Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 15 Nov. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

5. Radojcic M., Halsan K., Gutman I., Dernfalk A., Carlshem L., and Wallin L. “Comparative testing of different anti-ice coatings for overhead line conductors with special focus on ice accretion, RIV and visual impact”, IWAIS-2013, St. John’s, NL, Canada, 8-11 September 2013, Session 1, p. 13-18.

УДК 621.316

ДОСЛІДЖЕННЯ ЙМОВІРНОГО СКЛАДУ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПУНКТУ НЕЗЛАМНОСТІ

Задерієнко С. І., к.військ.н., доц., e-mail: setyanin@ukr.net
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

Актуальність дослідження. У результаті ворожих атак російських військ руйнуються і виходять з ладу об’єкти енергетичної інфраструктури держави, з метою подолання наслідків Кабінет Міністрів України затвердив Порядок організації та функціонування пунктів незламності [1]. Станом на сьогодні склад автономних джерел електроенергії, що можуть використовуватися стаціонарним або мобільним пунктом незламності є малодослідженим і недостатньо описаним у науковій літературі. Тож поки триває повномасштабна збройна агресія проти України дослідження у напрямку визначення імовірного складу автономних джерел електроенергії пункту незламності залишаються актуальними.

Метою дослідження є аналіз імовірного складу автономних джерел електроенергії пункту незламності.

Основні матеріали досліджень. У відповідності до Порядку [1] оснащення пунктів незламності засобами автономної генерації електроенергії проводиться органами виконавчої влади та органами місцевого самоврядування з урахуванням наявного технічного ресурсу. У ході комплектування пункту незламності посадові особи органів виконавчої влади та місцевого самоврядування, як правило використовують:

1) електрогенератори із запасами пально-мастильних матеріалів і комплектами кабельної мережі на відповідну потужність, залежну від проєктної кількості відвідувачів, площі розташування, потужності систем освітлення, опалення (теплогенеруючих пристроїв), зв'язку тощо;

2) мережеві подовжувачі у кількості, достатній для одночасного заряджання не менш ніж 50 мобільних пристроїв (телефонів, планшетів, ноутбуків, повербанків).

Аналіз паспортів пунктів незламності [2, 3] показує, що у більшості випадків найбільш розповсюдженими електричними генераторами є пристрої з бензиновим двигуном і з вихідною потужністю від 2,5 до 7,5 кВт. Навіть поверхневе співставлення проєктної кількості відвідувачів пункту незламності до потужності електрогенератора, який його забезпечує складає 10:1. Тобто приблизно на кожні 10 відвідувачів припадає 1 кВт згенерованої електричної потужності, а пункт на 70–80 осіб, як правило має бензиновий генератор на 7,5 кВт.

Хоча рішення використовувати електрогенеруючі пристрої на рідкому пальному здається раціональним, досвід ведення бойових дій показує, що ракетні й авіаційні удари противника по місцям виробництва або зберігання нафтопродуктів і логістичним маршрутам можуть призвести до появи дефіциту пально-мастильних матеріалів. Застосування у автономних системах енергозабезпечення джерел живлення одного лише рідкопаливного типу може виявитись ненадійним.

З урахуванням поточної обстановки, особливої актуальності в даний час набуває вирішення завдання з електропостачання в умовах відсутності хоча б мінімальної кількості пально-мастильних матеріалів, або коли виникли будь-які експлуатаційні обмеження електрогенератора (наприклад, поріг на безперервність роботи, вади надійності, ліміт моторесурсу, дефіцит заявленої потужності). Це очевидно вимагає включення в комплект оснащення пункту незламності різнотипних автономних джерел електроенергії [4], у тому числі перетворювачів напруги акумуляторного типу (ПНАТ), які перш за все мають бути мобільними, мати габаритно-вагові характеристики, що дозволяють забезпечити їх переміщення (мобільність), у тому числі і в “похідному” або “переносному” варіанті. Крім того, щоб вони мали достатню внутрішню ємкість, тривалий термін служби (понад п'ять тисяч циклів заряд-розряду), стабілізовану напругу, низький саморозряд і що найбільш

важливо характеризувались би високою безпекою для оточуючих.

У даному випадку ПНАТ являє собою систему здатну видавати на виході фазну напругу, в якій інвертор (перетворювач) об'єднаний з акумуляторною батареєю (накопичувачем). Габаритно-вагові показники ПНАТ та їх мобільність характеризують можливість переміщати це джерело енергії за допомогою транспортних засобів (автомобільної техніки) або слугувати переносним варіантом, яке одна людина буде здатна підняти і переносити в особистих речах. Під достатньою внутрішньою ємкістю слід розуміти здатність ПНАТ віддавати заряд якомога довше і забезпечувати повне заряджання електроприймачів заданої кількості та з певною потужністю мінімально необхідну кількість разів, відповідно до заданого періоду автономності пункту незламності (від кількох годин до кількох днів).

Для заряджання розряджених ПНАТ може використовуватися стаціонарна електромережа будівель (споруд), електрогенератори на рідкому паливі, генератори на сонячних панелях, вітроелектрогенератори тощо.

На основі проведеного у роботі аналізу можна виділити три основні групи ПНАТ, які можуть бути включені до імовірного складу автономних джерел електроенергії пункту незламності, зокрема:

а) ПНАТ на основі літій-іонних акумуляторів наступних видів: літій-залізо-фосфатні $LiFePO_4$, кобальт-літієві $LiCoO_2$, літій-марганцеві $LiMn_2O_4$;

б) ПНАТ на основі нікель-метало-гідридних акумуляторів: нікель-кадмієвих (NiCd), нікель-металогідридних (NiMH);

в) ПНАТ іноваційного типу, які перебувають у стадії розробки, а в їх основі лежать процеси термохімічних, фотоелектрохімічних, фотобіологічних перетворень або електролізу.

При виборі ПНАТ, як правило, проводиться порівняльний аналіз їхніх експлуатаційних характеристик включаючи: щільність енергії, температурні діапазони експлуатації, ефект пам’яті, швидкість саморозряду, ресурс циклів заряд-розряд та безпеку застосування.

Висновок. З метою підтримки населення у приміщеннях об’єктів державної та комунальної власності розгортаються стаціонарні, а за потреби – в наметах і транспортних засобах мобільні пункти незламності. Під час розгортання пункту незламності відбувається формування складу автономних джерел електроенергії, що носить імовірнісний характер у залежності від технічних і фінансових можливостей органів виконавчої влади та місцевого самоврядування. Електрогенератори на рідкому пальному, якими зараз комплектуються пункти незламності, залежні від безперебійного постачання пально-мастильних матеріалів і у разі виникнення дефіциту останніх можуть виявитись недостатніми для генерації потрібної енергетичної потужності. Результати дослідження можуть бути використані для формування технічних рекомендацій щодо комплектації пунктів незламності, а також для подальших розробок у сфері автономного енергозабезпечення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Питання організації та функціонування пунктів незламності. Постанова Кабінету Міністрів України від 17.12.2022 № 1401. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1401-2022-п#Text (дата звернення: 29.10.2025).

2. Великодолинська селищна рада, Одеський район, Одеська область. Паспорти пунктів незламності. URL: https://vdolynske.od.gov.ua/wp-content/uploads/2023/11/Pasporti-punktiv-nezlamnosti.pdf (дата звернення: 30.10.2025).

3. Петрівська селищна рада, Олександрійський район, Кіровоградська область. Про організацію та функціонування стаціонарних пунктів обігріву “Пунктів незламності”. Розпорядження Петрівського селищного голови від 26.12.2022 № 109-р. URL: https://pt-rada.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/№-109-від-26-грудня-2022-року-Пункт-незламн.docx.

4. Федорів М.Й., Гладь І.В., Бацала Я.В. Актуальні питання впровадження резервних джерел живлення. Sworld-Us Conference proceedings, 1 (usc 22-01), 2024. С.24–27. URL: https://doi.org/10.30888/2709-2267.2024-22-00-024.

УДК 663.004.183; 631.172

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

Засуха О. М., магістр, e-mail: ssanya.zas@gmail.com
Дудніков С. М., доц., dydnikov@btu.kharkov.ua
Пазій В. Г., ст. викл., pazziy@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Зниження економічної ефективності функціонування систем електропостачання підприємств значною мірою обумовлене недосконалістю існуючих схем моніторингу, контролю та обліку витрат енергоресурсів, а також низькою якістю їх технічного обслуговування. Невід'ємним елементом автоматизованої системи керування електропостачанням (АСКУЕ) виступає автоматизована система контролю та обліку енергоспоживання (АСКОЕ), що реалізує обмін даними зі споживачами й джерелами енергії через різні канали комунікації. Однак передавальні лінії часто зазнають впливу електромагнітних перешкод, що призводить до зниження достовірності інформації та ефективності керування енергетичними процесами.

Мета дослідження – удосконалення систем електропостачання виробничих підприємств шляхом підвищення ефективності енергоспоживання та надійності передачі даних в АСКОЕ із використанням технології PLC.

Основні матеріали досліджень. За даними аналізу літературних джерел [1] що структура втрат електроенергії в системах електропостачання безпосередньо залежить від класу напруги та характеру навантаження споживачів. На рисунку 1 наведено порівняльну характеристику втрат електричної енергії в електричних мережах різних рівнів напруги. Як видно з діаграми, найбільші втрати припадають на мережі низької напруги (0,4 кВ). Це зумовлено низкою об'єктивних чинників: значною протяжністю повітряних і кабельних ліній, великою кількістю приєднань до споживачів, високим питомим опором проводів, а також нерівномірністю розподілу навантаження між фазами.

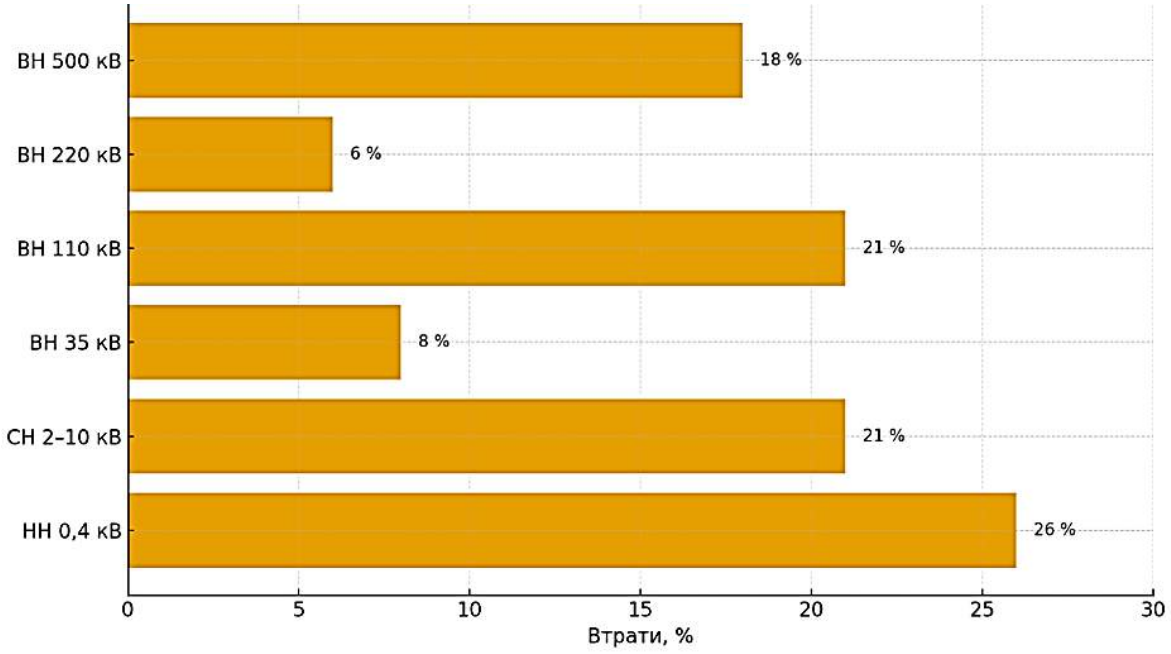


Рисунок 1 – Втрати електроенергії за класами напруги

У сільських і промислових електромережах низької напруги часто спостерігається несиметрія напруг, перевантаження окремих ділянок ліній, а також втрати на нагрівання

проводів та контактних з’єднань. Ситуацію ускладнює наявність великої кількості малопотужних споживачів, розосереджених на значній території, що призводить до збільшення довжини відгалужень і, відповідно, до зростання активних втрат. Крім того, до цієї групи додаються втрати, пов’язані з неефективною роботою трансформаторів розподільчих підстанцій, особливо при їх неповному завантаженні.

Із підвищенням класу напруги, тобто при переході від 0,4 кВ до 6–10 кВ, а далі до 35 кВ і вище, величина втрат електроенергії помітно зменшується. Це пояснюється зниженням струмів у лініях при тій самій переданій потужності, а отже, зменшенням активних втрат за законом Джоуля–Ленца. На рівнях напруги 110–220 кВ втрати становлять лише кілька відсотків, що є значно нижчим показником порівняно з низьковольтними мережами. Проте навіть незначні відносні втрати на високовольтному рівні при великих обсягах переданої енергії можуть мати суттєвий економічний ефект.

З метою зменшення втрат і підвищення достовірності контролю енергетичних процесів доцільно впроваджувати автоматизовані системи контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ), які дозволяють здійснювати точний моніторинг технічного стану мереж, своєчасно виявляти перевантаження, несиметрію напруги, дисбаланс навантажень і несанкціоновані підключення. Особливу роль у таких системах відіграє технологія передачі даних PLC (Power Line Communication), що забезпечує можливість обміну інформацією безпосередньо по існуючих електричних лініях, без необхідності прокладання додаткових кабелів зв’язку. Це значно знижує капітальні витрати на впровадження системи й робить її більш гнучкою у застосуванні для об’єктів із розгалуженою інфраструктурою.

Реалізація АСКОЕ в мережах виконується за допомогою GSM/GPRS-мережі, PLC-мережі, технологій TCP-IP та дротових послідовних інтерфейсів RS-485, RS-232, M-BUS [2]. Основна перевага PLC-технології – можливість використовувати вже існуючі електричні мережі для передачі даних. Особливостями застосування PLC-технології є: 1 – Невелика кількість ВЧ-каналів на окремій лінії електропередачі; 2 – низький рівень лінійних перешкод; 3 – можливість обрання частоти каналів передачі даних і зв’язку незалежно від частот каналів у сусідніх районах. У поєднанні з цифровими вимірювальними приладами, мікропроцесорними контролерами та програмно-аналітичними комплексами, АСКОЕ на базі PLC-технології дозволяє не лише фіксувати споживання енергії, а й реалізовувати елементи інтелектуального керування – корекцію режимів навантаження, прогнозування енергоспоживання, аналіз якості електроенергії та оцінку технічного стану елементів мережі. Це відкриває можливість для створення «розумних» енергетичних систем, здатних до самодіагностики та оптимізації роботи в реальному часі.

Отже, з огляду на результати аналізу, найбільш критичними для підвищення енергоефективності залишаються розподільчі мережі низької та середньої напруги, які потребують модернізації з урахуванням сучасних технологій вимірювання та передачі даних. Впровадження АСКОЕ з використанням PLC-технологій дозволяє не лише скоротити втрати електроенергії, але й підвищити точність обліку, зменшити експлуатаційні витрати та створити умови для подальшої цифровізації енергетичного сектору України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Qawaqzeh, M., Dudnikov, S., Miroshnyk, O., Moroz, O., Savchenko, O., Trunova, I., Pazyi, V., Danylchenko, D., Iegorov, O., Halko, S., Buinyi, R. Development of Algorithm for the Operation of a Combined Power Supply System with Renewable Sources (2022) 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 – Conference Proceedings, DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372

2. Тельной Д. С. Обґрунтування використання PLC-технологій / Д. С. Тельной ; наук. керівник С. М. Дудніков // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді : II Всеукр. наук.-практ. конф., 2 квіт. 2024 р. – Харків : ДБТУ, 2024.

УДК 628.94

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СВІТЛОДІОДНИХ СВІТИЛЬНИКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Козир М. В., студ., e-mail: maksym.kozyr@kname.edu.ua
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Актуальність дослідження. Розвиток енергоефективних технологій освітлення є одним із пріоритетних напрямів сучасної електротехніки та світлотехніки. Світлодіодні (LED) джерела світла поступово замінюють традиційні лампи завдяки високій енергоефективності, довговічності та можливості керування спектральними характеристиками. Однак у процесі експлуатації виявляються проблеми, пов’язані з тепловими втратами, деградацією кристалів, нерівномірністю розподілу світлового потоку та зниженням ефективності при підвищенні температури. Це потребує комплексного підходу до аналізу світлодіодних світильників, який охоплює як моделювання теплових і світлових процесів, так і експериментальну перевірку результатів. Впровадження методів віртуального прототипування дозволяє скоротити витрати на розробку нових LED-модулів, підвищити точність оцінки параметрів і забезпечити стабільність роботи світлотехнічних систем у реальних умовах. У сучасних умовах стрімкого розвитку світлодіодних технологій особливої ваги набуває питання достовірності фотометричних вимірювань. Світлодіодні світильники характеризуються складними спектральними розподілами випромінювання, нелінійною залежністю світлових параметрів від температури та струму живлення, що ускладнює проведення коректних вимірювань їх світлотехнічних характеристик.

Традиційні методики фотометричних вимірювань, розроблені для газорозрядних та ламп розжарювання, не завжди забезпечують необхідну точність при дослідженні LED-джерел світла. Тому виникає потреба у вдосконаленні процедур калібрування, визначення похибок та оцінки невизначеності результатів вимірювань відповідно до вимог сучасних стандартів (зокрема, ISO/IEC, CIE, ДСТУ).

Розрахунок невизначеності фотометричних вимірювань є необхідним елементом забезпечення якості вимірювального процесу, що дозволяє підвищити достовірність порівняння результатів між лабораторіями, оптимізувати процеси контролю якості та підтримувати відповідність продукції міжнародним нормам.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розроблення методики оцінювання невизначеності фотометричних вимірювань для світлодіодних світильників, мають важливе значення для підвищення точності випробувань, удосконалення метрологічного забезпечення світлотехнічних вимірювань і розвитку енергоефективних технологій освітлення.

Мета дослідження. Проведення комплексного аналізу характеристик світлодіодних світильників із використанням методів комп’ютерного моделювання та експериментальних досліджень для визначення впливу конструктивних і теплових параметрів на світлову ефективність. Для досягнення поставленої мети передбачено розробити електротеплову модель світлодіодного модуля на основі еквівалентної електричної схеми, виконати світлотехнічне моделювання у програмному середовищі *DIALux EVO* для аналізу розподілу освітленості, провести експериментальні вимірювання параметрів світлового потоку, колірної температури та ККД при різних теплових режимах, зіставити результати моделювання та експерименту для визначення похибки та уточнення моделі.

Основні матеріали досліджень. У роботі використовувалися багатокристальні світлодіодні модулі потужністю 10–30 Вт на алюмінієвих підкладках з активним та пасивним охолодженням. Моделювання теплових процесів проводилося у середовищі із побудовою тривимірної моделі теплового поля. Як граничні умови задавалися значення температури

підкладки, тепловий потік та коефіцієнт тепловіддачі. Розрахунок теплового опору здійснювався за формулою:

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P_d},$$

де T_j – температура p–n переходу, T_a – температура навколишнього середовища, P_d – потужність розсіювання.

Світлотехнічні характеристики оцінювались за допомогою інтегруючої сфери та спектрорадіометра, що дозволило визначити залежність світлового потоку від температури корпусу. Результати показали, що при підвищенні температури з 25 °C до 80 °C світлова віддача знижується на 12–15 %. Найкращу стабільність продемонстрували модулі з тепловим опором не вище 2,5 °C/Вт. Додатково було виконано аналіз спектральних характеристик – зі збільшенням температури відбувається зміщення максимуму випромінювання у бік довших хвиль на 3–5 нм, що може впливати на колірну температуру освітлення. Комп'ютерне моделювання дозволило оптимізувати конструкцію радіатора та визначити зони локального перегріву, які в експерименті підтвердилися термографічним контролем.

Висновок. Комплексний підхід, що поєднує теплове та світлотехнічне моделювання з експериментом, забезпечує високу точність оцінки ефективності світлодіодних світильників. Температура p–n переходу є ключовим параметром, що визначає стабільність світлового потоку та тривалість роботи LED-модуля. Оптимізація конструкції корпусу та системи охолодження дозволяє зменшити тепловий опір до 2–3 °C/Вт, що підвищує енергоефективність на 10–12 %. Розроблений алгоритм аналізу може бути використаний для інженерного проєктування світлодіодних систем загального освітлення, архітектурних і промислових світильників.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Фізика і техніка світлодіодів : навч. посібник / Л. А. Назаренко, А. І. Колесник ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 255 с.
2. Uncertainty Evaluation of Two-Dimensional Horizontal Distributed Photometric Sensor Based on MCM for Illuminance Measurement Task – Sun J., Wang Y., Cheng Y. та ін. *Sensors*, 2025; 25(15): 4648.
3. Photometric measurements of lighting quality: An overview – Kruisselbrink T. *Building and Environment*, 2018.
4. Назаренко Л. А., Сорокін В. М. *Основи радіометрії та фотометрії.*
5. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – 352 с. – Режим доступу: https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0053971.pdf

УДК 621.31:574.5

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ БІОІНСПІРОВАНОЇ ЕЕС

Козловський О. А., к.т.н., доц., e-mail: kozlovskyioa@gmail.com
Центральноукраїнський національний технічний університет

Актуальність дослідження. Електроенергетичні системи (ЕЕС) пройшли тривалий шлях еволюції – від локальних джерел постійного струму до потужних централізованих енергооб'єднань змінного струму, які охоплюють цілі країни. Стрімке зростання потреби у декарбонізації сприяло широкому впровадженню відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Інтеграція ВДЕ в традиційні ЕЕС спричинила ряд проблем – нестабільність виробництва, складність балансування навантаження, зниження інерційності системи, ускладнення оперативно-диспетчерського управління та підвищення вимог до гнучкості мережі.

Розвиток технологій інтелектуальних мереж (smart grid), що поєднують цифровізацію [1], розподілену генерацію, накопичувачі та автоматизоване управління, став спробою розв'язати ці проблеми. Однак, smart grid також має ряд обмежень – це складність інтеграції в умовах застарілої інфраструктури, обмежена стійкість до деструктивних впливів, уразливість до кібератак, висока залежність від комунікаційних мереж. В сучасних умовах в Україні, де об'єкти енергетики стали ціллю масованих ракетно-дронових ударів, недоліки та вразливості існуючих ЕЕС набули критичного значення. Тому виникає потреба в розробці нових підходів до архітектури електроенергетичних систем, які б забезпечили граничну стійкість, адаптивність, автономність і здатність до самовідновлення за непередбачуваних обставин.

Мета дослідження – формулювання теоретичних засад побудови біоінспірованої електроенергетичної системи з граничною стійкістю.

Основні матеріали досліджень. Розвиток технологій smart grid став відповіддю на ускладнення режимів роботи ЕЕС зі зростанням частки ВДЕ, появою активного споживача та необхідністю підвищення керованості розподільних мереж. Інтелектуалізація мережі передбачала широке застосування вимірювальної інфраструктури, цифрових каналів зв'язку, АСКОЕ та інтеграцію розподіленої генерації і систем накопичення енергії. Проте досвід експлуатації таких «гібридних» мереж показав, що smart grid краще розв'язує задачі ефективності й керованості, ніж задачі живучості та збереження працездатності при цілеспрямованих зовнішніх впливах. Типовими проблемами, які виявилися у ході воєнних дій на території України, є висока концентрація критичних функцій у центрах генерації та керування, залежність режимів роботи від працездатності телемеханічних каналів, відсутність швидких сценаріїв «розпадання» системи на фрагменти при недостатньому рівні фізичного і кібернетичного захисту обладнання. Крім того, зростання питомої ваги ВДЕ на тлі пошкоджень магістральних мереж створило передумови для появи локальних енергетичних «островів», які не були спроєктовані як повністю самодостатні, а отже потребували аварійних схем живлення, перекидних ліній та ручного диспетчерського втручання. Це свідчить, що модернізована за принципами smart grid мережа залишається концептуально мережею третього покоління (за еволюційною класифікацією) із централізованою логікою та фіксованою топологією, на яку нашаровано інтелектуальні функції.

Одним із шляхів вирішення цих проблем є перехід від парадигми «інтелектуалізувати наявну мережу» до парадигми «побудувати мережу як живу систему». Яка обґрунтовується за допомогою п'яти базових біоінспірованих принципів: децентралізації та автономності, ройового інтелекту та самоорганізації, адаптивної топології та самовідновлення, фрактальної модульності та масштабованості, активної протидії та кібер-імунітету.

Принцип децентралізації та автономності дає змогу усунути проблему вразливості вузлових елементів ЕЕС. Замість великих електростанцій і вузлових підстанцій, пошкодження яких призводить до знеструмлення десятків тисяч споживачів, пропонується формувати мережу з відносно малих за потужністю комірок, здатних у разі втрати зв'язку з

ЕЕС перейти в ізольований режим роботи. Подібний підхід розглянуто в [2], де кластери DC microgrid розглядаються як керовані, але автономні комірки.

Принцип ройового інтелекту та самоорганізації спрямований на подолання залежності від єдиного комунікаційного каналу та централізованих обчислювальних ресурсів. Глобально узгоджений режим роботи досягається не завдяки централізованому управлінню АСДУ, а як емерджентний результат локальних взаємодій між сусідніми комірками, що узгоджують потужність, напрямки перетоків і пріоритети живлення у форматі peer-to-peer. Підхід самоорганізованої електрифікації територій, відомий як swarm electrification [3], підтверджує ефективність колективної взаємодії малих енергетичних джерел, однак у запропонованій концепції цей принцип переорієнтовано на забезпечення живучості ЕЕС в умовах в умовах масштабних аварій та навмисних ушкоджень енергетичної інфраструктури.

Принцип адаптивної топології та самовідновлення компенсує головний структурний недолік більшості існуючих smart-рішень: вони передбачають керованість режимів, але не забезпечують морфогенез самої мережі. Для України, де щоденно ушкоджується електротехнічне обладнання, критично важливою властивістю стає не лише можливість ізолювання пошкоджених ділянок, а й здатність мережі автоматично формувати обхідні кола, тимчасово змінювати конфігурацію електричних з'єднань і підтримувати живлення об'єктів критичної інфраструктури. Така поведінка властива біологічним структурам і підтверджується результатами створення робастних енергомереж на основі біоінспірованих підходів [4], які доводять доцільність наявності «надлишкових» шляхів електропередачі. У запропонованій концепції цей принцип має прикладне значення для підвищення живучості ЕЕС в умовах масштабних аварій та навмисних ушкоджень інфраструктури.

Принцип фрактальної модульності та масштабованості забезпечує технологічну реалізованість попередніх трьох принципів: усі рівні системи будуються за однаковими правилами – від комірки до стільника і далі до міжрегіонального кластера. Така самоподібна організація дає змогу швидко замінювати пошкоджені елементи (plug-and-play на рівні комірки/стільника), нарощувати мережу та підтримувати узгоджене керування топологією на кожному рівні. Концептуально це відповідає підходам фрактального структурування smart grid [5], де самоподібність і модульність спрощують децентралізовану реалізацію та прискорюють відновлення працездатності ЕЕС після пошкоджень.

Принцип активної протидії та кібер-імунітету полягає у здатності ЕЕС автоматично виявляти, класифікувати та ізолювати загрози, формуючи адаптивний захист, що вдосконалюється на основі попередніх інцидентів. На відміну від класичних систем кіберзахисту, ці функції закладаються на рівень окремої комірки/стільника, щоб ураження одного елемента не спричиняло втрати керованості всієї мережі. Подібні підходи до імунологічного захисту енергосистем описані в [6], однак у нашому випадку цей принцип охоплює також фізичні та комбіновані впливи на енергетичну інфраструктуру.

Висновок. Запропоновано набір біоінспірованих принципів, поєднання яких забезпечує формування децентралізованої електроенергетичної системи з підвищеною живучістю та здатністю до самовідновлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Штучний інтелект в енергетиці / Суходоля О. М. К.: НІСД, 2022. 49 с.

2. Al-Tameemi Z. H. A., Lie T. T., Foo G., Blaabjerg F. Control strategies of DC microgrids cluster: a comprehensive review. Energies. 2021. Vol. 14, No. 22. 7569.

3. Sheridan S., Sunderland K., Courtney J. Swarm electrification: A comprehensive literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 175. 113187.

4. Panyam V., Huang H., Davis K., Layton A. Bio-inspired design for robust power grid networks. Applied Energy. 2019. Vol. 251. 113361.

5. Ilo A. Design of the smart grid architecture according to fractal principles and the basics of corresponding market structure. Energies. 2019. Vol. 12, No. 21. 4153.

6. Hussain M. M., Sadanandan S. K., Srivastava A. K., Sarwari A. R., Reece R. Building cyber-attack immunity in electric energy system inspired by infectious disease ecology. 2024. Vol. 12.

УДК 628.94

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СВІТЛОДІОДНИМ ОСВІТЛЕННЯМ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА

Колесник А. І., к.т.н., ст. викл., e-mail: Anastasia.kolesnyk@kname.edu.ua
Удовиця М. О., студ., e-mail: Maksym.Udovytsia@kname.edu.ua
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Актуальність дослідження. У роботі розглянуто принципи побудови мікроконтролерної системи керування енергопостачанням світлодіодних світильників. Основна увага приділена питанням підвищення енергоефективності та стабільності світлотехнічних параметрів при зміні зовнішніх умов живлення. Сучасні тенденції розвитку світлотехнічних систем пов'язані з упровадженням енергоощадних технологій та автоматизованих систем керування. Світлодіодні світильники є основою енергоефективного освітлення, проте стабільність їх світлових характеристик залежить від режимів живлення та температурних факторів. Тому використання мікроконтролерних систем для керування живленням світлодіодних модулів забезпечує точне регулювання струму, адаптацію яскравості до зовнішніх умов і зниження споживаної енергії. Додаткові сенсорні модулі дозволяють реалізувати зворотний зв'язок і підвищити точність підтримання освітленості у реальному часі.

Метою дослідження є розроблення мікроконтролерної системи, яка забезпечує стабільне енергопостачання та керування світлодіодними світильниками з урахуванням спектральних і електричних характеристик. Основні завдання полягають в наступному:

1. Проаналізувати залежність світлового потоку від струму живлення.
2. Визначити оптимальні режими роботи світильника для максимізації енергоефективності.
3. Розробити алгоритми мікроконтролерного керування (ШІМ + зворотний зв'язок по світловому потоку).
4. Провести експериментальні вимірювання спектральних і електричних параметрів дослідного зразка світлодіодного світильника.

В якості бази використано мікроконтролер Arduino Uno, який керує світлодіодним модулем через широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ). Система оснащена цифровим сенсором освітленості BH1750, що вимірює рівень освітленості в реальному часі та формує сигнал зворотного зв'язку для стабілізації світлового потоку. Алгоритм керування реалізовано у вигляді пропорційно-інтегрального регулятора, що змінює коефіцієнт заповнення ШІМ відповідно до різниці між заданим і виміряним рівнем освітленості. Додатково враховуються параметри температури кристала LED для запобігання перегріву та деградації люмінофору. Система може бути масштабована для керування кількома світильниками або каналами RGBW із окремими контурами регулювання. Система побудована на базі мікроконтролера з вбудованими каналами АЦП для вимірювання струму, напруги та температури.

Основні матеріали дослідження. Для забезпечення коректного регулювання рівня освітлення необхідно отримувати достовірну інформацію про поточну яскравість приміщення. Це реалізується за допомогою датчиків освітленості, які дозволяють реєструвати інтенсивність світлового потоку навіть за умов низької освітленості. В роботі пропонується використання спеціалізованого сенсору HSDL-9000, що відзначається високою чутливістю та низькою вартістю. Цей фотосенсор має цифровий вихід, який фіксує рівень навколишнього освітлення. Чутливий елемент сенсора розміщений у мініатюрному корпусі та містить фотодіод, спектральна характеристика якого максимально наближена до кривої видимості людського ока з піком близько 550 нм. Завдяки цьому пристрій забезпечує високу точність вимірювання, що відповідає сприйняттю освітленості людиною. Одним із найпоширеніших типів сенсорів для вимірювання освітленості є фоторезистор – аналоговий елемент, опір якого змінюється пропорційно інтенсивності падаючого світла. Однак його точність обмежена, а результати вимірювань не подаються безпосередньо в люксах. На

відміну від нього, модуль GY-302 на основі мікросхеми BH1750 є високоточним цифровим датчиком освітленості, що безпосередньо формує вихідні дані у люксах (лк). Цей датчик призначений для вимірювання фонового освітлення й побудований на базі 16-бітного АЦП, який перетворює аналоговий сигнал фотодіода у цифрові дані. Фотодіод BH1750 сприймає інтенсивність падаючого світла, яку попередньо перетворює в електричну напругу через операційний підсилювач. Вбудований аналого-цифровий перетворювач забезпечує вихід точних 16-бітних цифрових значень. Завдяки внутрішній логіці мікросхеми BH1750, користувач отримує готові результати вимірювання в люксах без необхідності виконання додаткових розрахунків або калібрувань, що значно спрощує інтеграцію датчика у мікроконтролерні системи освітлення. Для реалізації автоматизованого регулювання освітленості у світлодіодних системах застосовується зворотний зв'язок між модулем вимірювання освітлення та мікроконтролером, який керує джерелом живлення світильника через ШІМ-модуляцію. Основним завданням є підтримання стабільного рівня освітленості незалежно від змін зовнішнього світлового середовища. Таким чином, мікроконтролер змінює яскравість світильника, забезпечуючи точну відповідність виміряного рівня освітлення встановленому значенню. Алгоритм керування може реалізовуватись за принципом пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора, який мінімізує різницю між фактичним та заданим рівнями освітленості. При зниженні освітлення (наприклад, у сутінках) система автоматично збільшує заповнення ШІМ-сигналу, підвищуючи струм живлення LED-модуля, а при надмірному освітленні – зменшує яскравість, знижуючи споживання енергії. Використання такого підходу забезпечує стабільність світлового потоку, зменшення енергоспоживання та плавне регулювання яскравості без мерехтіння. Додатково система може враховувати спектральні характеристики для корекції струму живлення, що особливо важливо при роботі високопотужних світлодіодів. За результатами вимірювань дослідного зразка світлодіодного світильника було визначено основні його характеристики: колірна температура (CCT = 4525 K), координати кольорів (x = 0.3614, y = 0.3723), індекс передачі кольору (Ra = 80.2), світловий потік – 1163.7 лм, ефективність – 106.4 лм/Вт при струмі I = 61 мА, напруга мережі U = 220 В, потужність P = 10.9 Вт, PF = 0.81.

Висновок. Запропонована система базується на використанні мікроконтролера, який здійснює моніторинг напруги, струму та рівня освітленості. Також розглянуто можливість дистанційного керування режимами роботи освітлення та збору даних через бездротовий інтерфейс. Проведено аналіз спектральних характеристик випромінювання та впливу стабільності живлення на показники кольоропередачі й яскравості. Розроблена система може бути використана в інтелектуальних освітлювальних мережах. Розроблена мікроконтролерна система дозволяє стабілізувати параметри живлення та підвищити енергоефективність LED-світильників. Застосування алгоритмів зворотного зв'язку забезпечує підтримання постійного світлового потоку при зміні навантаження та температури. За результатами аналізу виявлено оптимальний робочий діапазон (приблизно 60–90 мА), у якому досягається найкраще співвідношення світлового потоку та ефективності з мінімальним нагрівом. Проведений спектральний аналіз показав відсутність зміщення CCT у робочому діапазоні живлення. Отримані результати демонструють, що використання мікроконтролера дозволяє підтримувати оптимальні умови роботи світлодіодів, знижуючи навантаження на джерело живлення й підвищуючи загальну надійність системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Boylestad R., Nashelsky L. *Electronic Devices and Circuit Theory*. Pearson Education, 2021. 906 p.

2. Yusi Cheng, Chen Fang, Jingfeng Yuan and Lei Zhu. Design and Application of a Smart Lighting System Based on Distributed Wireless Sensor Networks *Appl. Sci.*, 2020. Vol. 10, P. 1-21. URL: https://www.researchgate.net/publication/347252561_Design_and_Application_of_a_Smart_Lighting_System_Based_on_Distributed_Wireless_Sensor_Networks

3. IEC 62756-1:2020. *Standard for LED Lamp Performance – Electrical and Photometric Parameters.*

УДК 621.4

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ МЕДИЧНОГО ЗАКЛАДУ З МЕТОЮ РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Логвін В. В., асп.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Галько Т. І., ст. викл.
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Старенький В. П., проф.
Державна установа «Інститут медичної радіології та онкології імені С. П. Григор'єва Національної академії медичних наук України»
Карпалюк І. Т., проф., e-mail: humpway@gmail.com
Інститут загальної енергетики НАН України

Актуальність дослідження. Розглядається питання нормальних режимів роботи медичного обладнання в медичному закладі. Сучасний розвиток медицини потребує значної кількості обладнання для надання відповідних послуг населенню. Все таке обладнання працює на електричній енергії, або виконання його роботи забезпечується електроприладами.

Мета дослідження – показати, що проведення аналізу існуючої енергетичної системи медичного закладу, можливо визначити хибні моменти і надати рекомендації по підвищенню якості роботи енергетичної системи, що підвищить терміни роботи сучасного медичного обладнання.

Основні матеріали досліджень. Якщо систематизувати всі електричні прилади в медичному закладі, то їх можна згрупувати на такі групи: перша група – це ті, що безпосередньо впливають на здоров'я пацієнтів (до них можна віднести електричні прилади операційної, прилади постійної діагностики, прилади підтримання життєдіяльності і деякі інші).

Друга група – це такі електроприлади, що забезпечують можливість функціонування медичного закладу (до них можна віднести систему електричного освітлення, кондиціонери, іонізатори повітря, стерилізатори, вентиляція та інші).

Третя група – це додаткові електроприлади (до них можна віднести комп'ютери і комп'ютерну мережу, принтери факси, внутрішній зв'язок та інші).

Кожна з цих груп важлива для діяльності медичного закладу. Такі прилади і електричні системи були впроваджені для того щоб медичний заклад міг виконувати свої функції. Але в даному випадку проводиться аналіз виключно з позиції електроспоживання. Здебільшого виходить так, що будівлі медичних закладів вже не нові. І декілька разів перебудовувалися і переобладнувалися. Поступало нове обладнання, змінювалися процедури, переобладнувалися кабінети. А електрична схема будівлі майже не змінювалася. Так, згідно нормативів закладалися розетки із розрахунковим довготривалим навантаженням до 1,3 кВт. Відповідно і кабель-провід закладався розрахункового перерізу для такої потужності. Навіть, якщо для приміщення планувалося безперервне електропостачання, за рахунок облаштування двох введень, то все одно переріз проводів обирався за економічним показником. Основна умова – це вимоги надійності [ДБН В.2.2-10:2022, ДСТУ IEC 62040-3:2004, ПУЕ 2025, ДБН В.2.5-23:2025, ДБН В.2.5-28:2018, ДСТУ Б В.2.5-82:2016].

Так, вимоги до якості електропостачання зазначаються тільки в «5.5 Необхідна надійність і якість живлення ІТ-устаткування локальних обчислювальних систем, систем передачі інформації тощо, досягається створенням СГЕ з використанням АБЖ певної конфігурації, генераторної установки (ДЕС тощо) і відповідної побудови силової розподільної мережі» [ДБН В.2.5-23:2025].

Тобто при проектуванні та переобладнанні електричної установки не проводиться аналіз на підтримання якісних характеристик електричної енергії. Тому схеми, які можуть

забезпечити вимоги по надійності не зможуть забезпечити вимоги по підтриманню якісних параметрів. Так була виявлена ситуація в медичному закладі, коли медичне обладнання не могло спрацювати, хоча в мережі була напруга відповідної величини. При аналізі ситуації виявилося, що медичне обладнання яке було під'єднано до електричної мережі установи, в режимі підготовки, прогріву і обробки даних споживало до 2 кВт але в режимі виконання замірів потужність зростала до 14 кВт. Такі стрибки струму і падіння напруги впливали не тільки на сам прилад але й на інше обладнання електромережі медичної установи. Аналіз топології електромережі медичного закладу показав, що для живлення потужного приладу із такою глибокою характеристикою було використано попередньо закладений провід, який міг би забезпечити 1,5 кВт довготривалого навантаження. До того ж довжина проводу не дозволяла витримати нормативи по падінню напруги. І це тільки один приклад із практики проведення аналізу якості електричної енергії в медичному закладі. Виходячи з того що кількість потужного обладнання в медичних закладах зростає. Зростає навантаження на електричну мережу. Причому більшість обладнання має саме глибокі характеристики споживання потужності. Це обумовлено вимогами до енергозбереження, прилад знаходиться в режимі очікування і мало споживає тільки в режимі роботи включається повене навантаження, і для того щоб зекономити час проведення процедури, або підвищити її ефективність потужність приладу зростає кратно, наприклад в десять разів. Звісно, що для таких приладів потрібні і відповідні схемні рішення електричної системи медичного закладу [1].

Якісні параметри електричної енергії не такі очевидні як надійність. Але в той же час саме через погану якість зменшуються терміни роботи основного електричного обладнання: трансформаторів, електродвигунів. Що може призводити навіть до пошкодження складного електрообладнання. Медичне обладнання і медичні прилади дуже дорого коштують. Наприклад, система мамографічна цифрова DM156A Shenzen Angell Technology коштує 11360 тис.грн [Посилання: https://goodmedika.com.ua/ua/rentgen-apparaty/mammografy/sistema-mammograficheskaya-cifrovaya-dm156a-shenzen-angell-t]. Підключення обладнання, що коштує 11 мільйонів гривень має відбуватися не тільки до надійних джерел живлення а до чистих з точки зору якості. Бувають випадки, коли від працездатності такого обладнання може залежати життя людини. Забезпечити якість можливо тільки в правильно організованій електричній мережі. Звісно, що при проектуванні нової будівлі медичного закладу, закласти в проектування відповідні вимоги можливо. Але мова йде про існуючи медичні заклади. В яких схема електропостачання, в деяких випадках, може не відповідати кресленням. Було розроблено алгоритм проведення аналізу електромережі, який включає: створення поетажного плану установи; побудова існуючої схеми підприємства (для цього використовуються: прилад пошуку проводки, мегомметр, мікрометр, тепловізор, рулетка, фотоапарат); порівняння існуючої схеми із проектом; опис електро обладнання в приміщення установи; перерахунок схеми за вимогами, наприклад, падіння напруги; підготовка рекомендацій по покращенню схеми електроживлення.

Висновок. Для покращення стану якості електричної енергії в медичному закладі, запропоновано проведення аналізу електричної схеми електропостачання, яка буде включати і приведення креслень до реального стану схеми і опис обладнання в приміщеннях і проведення розрахунків з урахуванням якісних показників. В результаті таких дій розробляються рекомендації по покращенню якості електричної енергії, впровадження яких призведе до підвищення строків експлуатації обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кибербезопасность и качество электрической энергии в системах медецинских объектов: Учебное пособие / Е.И. Сокол, О.Г. Гриб, В.П. Старенький и др. (Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є.І.). – Харків: ФОП Панов О.М., 2018. – 259 с.

УДК 621.314

МОДИФІКОВАНА МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Михайлова Л. М., к.т.н., проф., e-mail: mihajlovaimesg@gmail.com
Подільський державний університет
Ягуп К. В., д.т.н., проф., e-mail: kata3140@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Горлачук М. А., к.е.н, доц., e-mail: m.horlachuk@wunu.edu.ua
Ягуп В. Г., д.т.н., проф., e-mail: yagup.walery@gmail.com
Західноукраїнський національний університет

Актуальність дослідження. Сучасне проектування трансформаторів і моделювання процесів, що в них протікають, вимагають широкого застосовування спеціальних сучасних комп'ютерних програмних пакетів Simulink MATLAB, PSPICE, Micro-CAP, EWB-5.12, Desigh-Lab-8.0, OrCAD-9.2 Simscape. Для побудови адекватних моделей важливим є точність перерахунку паспортних даних реальних трансформаторів у параметри його математичної моделі, які залежать від заступної схеми трансформатора, що використовується в моделі. Останнім часом питання визначення параметрів заступних схем трансформаторів розглядалося у [1–3].

Метою дослідження є розробка нового алгоритму визначення параметрів моделей потужних трансформаторів, який заснований на співвідношеннях між робочими параметрами трансформатора і надає можливість за паспортними даними відразу розраховувати коефіцієнт зв'язку котушок трансформатора. Перевагою такого підходу є те, що він дозволяє спростити і прискорити розрахунки всіх інших параметрів моделей потужних трансформаторів в математичному пакеті MATLAB.

Основні матеріали досліджень. Для проведення дослідження використовувалася еквівалентна заступна схема, що зображена на рис. 1. Ця схема була реалізована в системі SimPower System математичного пакету MATLAB у вигляді візуальної моделі.

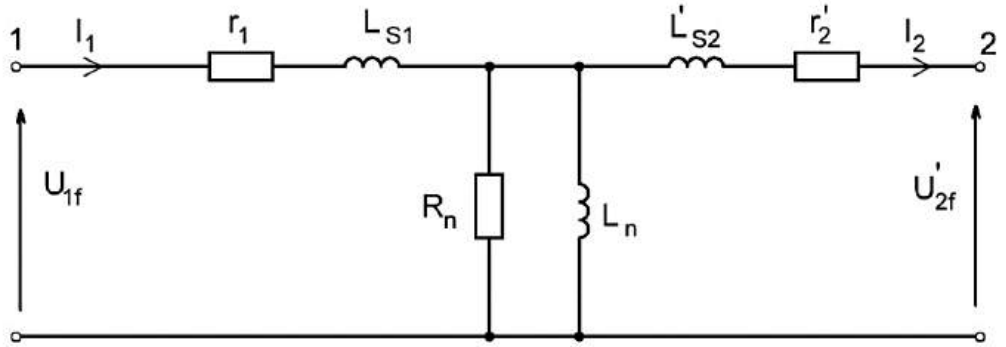


Рисунок 1 – Заступна схема моделі трансформатора в системі SimPowerSystem

У результаті проведеного дослідження був розроблений алгоритм визначення параметрів моделі трансформатора на основі використання SPS блока взаємно зв'язаних індуктивностей, який складається із таких кроків:

1. Визначаємо коефіцієнт зв'язку індуктивностей обмоток трансформатора $k_{12} = 1 - \frac{u_K i_x}{2}$
2. Визначаємо індуктивність первинної обмотки $L_1 = \frac{U_{1H}^2}{\omega i_x S_H}$

3. Визначаємо через коефіцієнт трансформації n_{21} та індуктивність вторинної обмотки $L_2 = n_{21}^2 L_1 = \frac{n_{21}^2 U_{1H}^2}{\omega i_x S_H}$

4. Взаємну індуктивність обмоток визначаємо за формулою. $M_{12} = k_{21}\sqrt{L_1 L_2} = (1 - \frac{u_K i_x}{2}) \frac{U_{1H} U_{2H}}{\omega i_x S_H}$

5. Визначаємо активний опір первинної і вторинної обмоток: $r_1 = \frac{P_K U_{1H}^2}{2S_H^2}$, $r_2 = \frac{P_K U_{2H}^2}{2S_H^2}$

6. Визначаємо опір резистора R, моделюючи втрати в сталі: $R = \frac{U_{1H}^2}{P_x}$

Перевірка точності розрахунків була здійснена на двох візуальних моделях, реалізованих в системі SimPower System математичного пакету MATLAB. Перша модель представляла однофазний трансформатор, що живиться фазною напругою із двома взаємозв'язаними індуктивностями. Параметри цього трансформатора були визначені за описаним вище алгоритмом. Друга модель представляє точну модель трансформатора, яка має заступну схему, зображену на рис. 2.

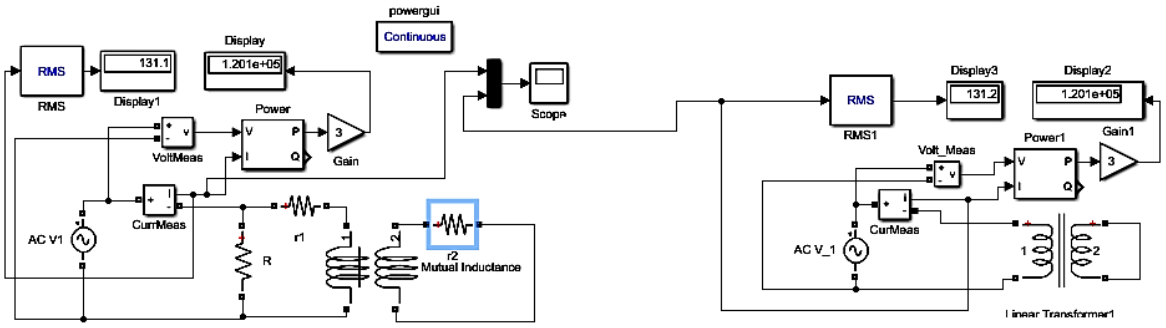


Рисунок 2 – Комп'ютерні моделі трансформатора в системі SimPowerSystem

Робота моделей у режимах неробочого ходу і короткого замикання продемонстрували розбіжність амплітуд струмів не перевищує 0.001 при складанні амплітуд струмів порядку 185 А.

Висновок. Виведено математичний вираз, що дозволяє за лише двома паспортними даними визначити коефіцієнт зв'язку первинної і вторинної індуктивностей трансформатору, що значно спрощує знаходження решти параметрів заступних схем трансформатора, необхідних для їх комп'ютерного моделювання. Використані в дослідженні дві моделі трансформатора, перша – трансформатор із взаємо пов'язаними індуктивностями, дуга – Т-подібна заступна схема, продемонстрували високий ступінь адекватності при порівнянні їх із точними моделями в системі MATLAB.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pentegov I. V., Rymar S. V., Volkov I. V. Relation between parameters of electromagnetic and schematic circuits and equivalent circuits of double-winding transformers. Electrical engineering and Electromechanics. 2006. №3. P. 67–79.

2. Zhang Z., Kang and N., Mousavi M. J. Real-time transformer parameter estimation using terminal measurements. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-5, doi:10.1109/PESGM.2015.7285958.

3. M. Bloech and M. H. Rashid, "PSpice Modeling of Three-Phase Transformer", 2007 39th North American Power Symposium, Las Cruces, NM, USA, 2007, pp. 76-79,

УДК 621.314

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИМЕТРО-КОМПЕНСУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Михайлова Л. М., к.т.н., проф., e-mail: mihajlovaimesg@gmail.com
Подільський державний університет
Ягуп К. В., д.т.н., проф., e-mail: kata3140@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Горлачук М. А., к.е.н, доц., e-mail: m.horlachuk@wunu.edu.ua
Ягуп В. Г., д.т.н., проф., e-mail: yagup.walery@gmail.com
Західноукраїнський національний університет

Актуальність дослідження. Якість електричної енергії має ключове значення для розвитку економіки, виробництва і промисловості, залізничного і міського електротранспорту та енергетики, для побутових споживачів. Нерівномірні навантаження негативно впливають як на споживачів так і на саму електричну систему, збільшуючи реактивну потужність, несиметрію струмів та перенапругу в нульовому проводі мережі.

Для усунення таких негативних явищ широко застосовують симетро-компенсувальні пристрої, що складаються із конденсаторів і індуктивностей, які підключаються на затискачах навантаження (рис. 1). Розрахунок параметрів елементів симетро-компенсувальних пристроїв для чотирипровідних систем представляє собою задачу, що складається з визначення типів і взаємного розташування елементів з подальшим розрахунком їх точних значень, а також визначення надлишкового елементу. В [1, 2] таку задачу вирішували із застосуванням пошукової оптимізації на спеціальних візуальних моделях, розроблених в пакеті Simulink середи MATLAB. Однак такий підхід представляється досить громіздким і складається з декількох етапів, які визначають топологію, що вимагає застосовувати обчислення на декількох різних моделях. Викоистання сучасних нейронних мереж надає можливість значно скоротити процес обчислення шляхом миттєвого визначення топології симетро-компенсувального пристрою.

Метою дослідження є визначення можливостей нейромереж вирішувати задачу синтезу симетро-компенсувального пристрою чотирипровідної системи електропостачання, із несиметричним активно-індуктивним навантаженням, а саме визначення надлишкового елементу і визначення типів елементів, які необхідно підключити на затискачах навантаження.

Основні матеріали досліджень. Для проведення дослідження була спроектована нейронна мережа у пакеті розширення системи MATLAB Neural Network Toolbox. Цей засіб представляє собою потужний інструмент, що забезпечують моделювання, розробку та глибоке навчання нейронних мереж. Для машинного навчання нейронної мережі було обрано метод Баєсівської регуляризації, перевагою якого є те, що цей підхід залишається вірним при достатньо невеликих об’ємах вибірки.

Для формування кортежу вхідних даних нейронних мереж використовувалися шість величин, що відповідали значенням опорів і індуктивностей в навантаженні фаз системи електропостачання відповідно ra, La, rb, Lb, rc, Lc.

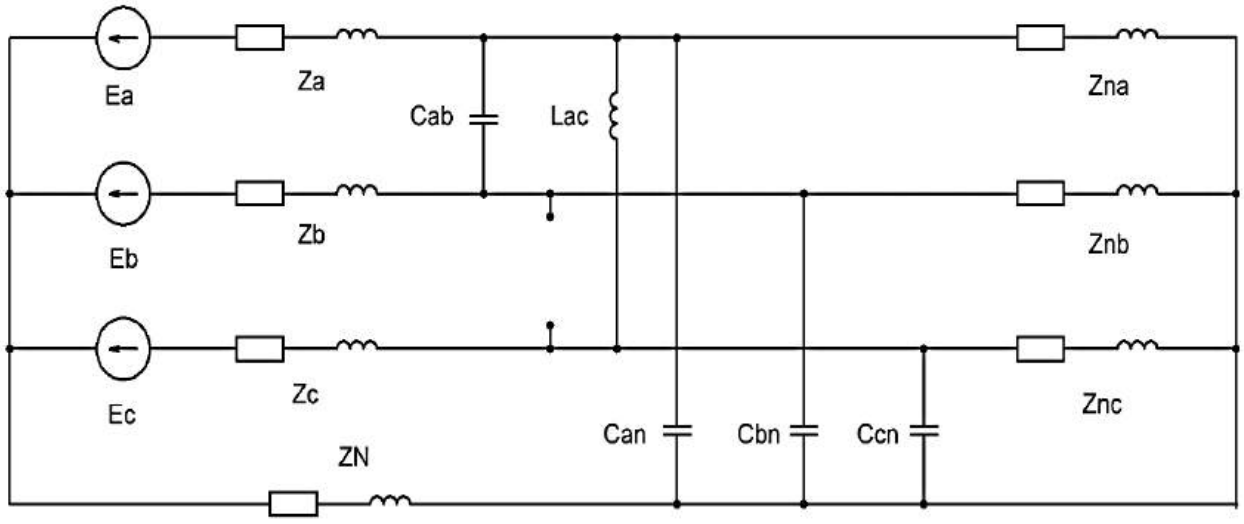


Рисунок 1 – Електрична схема чотирипровідної системи електропостачання із симетро-компенсувальним пристроєм

Для нейромережі, що визначає надлишковий елемент, кортеж цільових значень представляє собою шість вихідних величин, які визначають надлишковий елемент, що приймає значення 2, а величини, що відповідають елементам, які необхідно включити до складу симетро-компенсувального пристрою приймають значення 0. Для визначення топології були прийняті такі позначення: якщо елемент надлишковий, то він приймає значення 2, якщо елемент слід включити в схему симетро-компенсувального пристрою, то 0. Нейромережа, яка визначає типи елементів має також кортеж з відповідними шістьома значеннями, де 0 ставиться у відповідність належності типу до конденсатору, а 1 – до котушки індуктивності.

Проведені дослідження в більшості випадків продемонстрували правильне вирішення задачі синтезу нейромережею. Найбільш ефективною нейромережа виявила себе при визначенні толопогії пристрою, де однин елемент має бути індуктивним, всі інші чотири ємнісними. Проблемним виявилося вирішення у випадку, коли всі елементи мають бути конденсаторами, що потребує додаткових досліджень. В цілому застосування нейромереж виявило себе придатним для визначення топології симетро-компенсувального пристрою чотири провідної системи електропостачання із несиметричним навантаженням.

Висновок. Застосування нейронних мереж навчених методом Байєсівської регуляризації досить точно визначають надлишковий елемент і типи реактивних елементів симетнро-компенсувального пристрою несиметричної чотирипровідної системи електропостачання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ягуп Е. В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации / Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. 2016. № 1. С. 60–66.

2. Ягуп К. В. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання: Навчальний посібник / К. В. Ягуп, В. Г. Ягуп. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.

УДК 621.4

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖІ МЕГАПОЛІСА

Пишний О. В., асп.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Павлюк Д. О., асп.
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Карпалюк І. Т., проф., e-mail: humpway@gmail.com
Інститут загальної енергетики НАН України

Актуальність дослідження. Збільшення населення міст є загальносвітовою тенденцією розвинутих країн світу. Всесвітньо відомі дослідники стану розвитку населення світу, такі як Йозеф Гуглер, Кінгслі Девісом і Хільдою Голден виділили такі поняття як індустріалізація і урбанізація населення. Урбанізація – це процес зростання міст і міського населення, що супроводжується поширенням міського способу життя. Це явище включає в себе переміщення людей із сільської місцевості до міст, розвиток міської інфраструктури (будівництво житла, заводів, шкіл, лікарень) та перетворення міського способу життя на домінуючий.

Індустріалізація – це процес переходу від аграрного до промислового способу виробництва, який характеризується створенням великого машинного виробництва та розвитком промисловості. Іншими словами це кількість населення яка більше не займається сільським господарством у порівнянні із загальною кількістю населення, це поняття можна доповнити як індустріалізація населення. За останні десятиліття темпи зростання урбанізації по відношенню до індустріалізації значно зросли. Тобто поясненна частка населення яка мігрувала до міст не може бути пояснення тільки зростанням індустріального типу відносин в суспільстві. Темпи над зростання населення, що отримало назву надмірна урбанізація або надурбанізація. Вивченням цього феномену займалися різні вчені, які створили моделі і пояснення [1].

Для України таке явище також актуальне що показано в дослідженнях всесвітнього банку (рис. 1) [2].

Що також підтверджено біль сучасними дослідженнями і показано на рис. 2 [3].

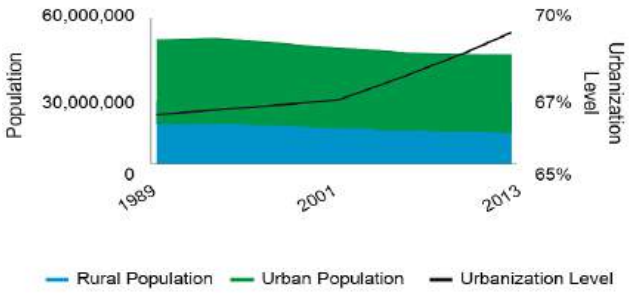


Рисунок 1 – Діаграма кількості урбанізованого населення і рівень урбанізації

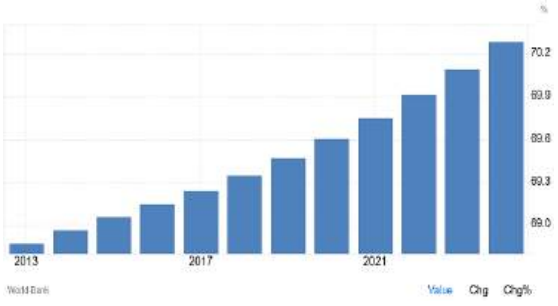


Рисунок 2 – Гістограма урбанізації в Україні по роках за даними Міжнародного банку

Звідси можна очікувати і явища в суспільстві й економіці в наслідок надурбанізації. Така ситуація в розвинених країнах створилася вже давно. Науковці засвідчили такі явища ще в 50-х роках. Тому для України можна побачити паралелі і підготуватися до викликів. Найбільша частка ВВП тепер створюється в містах. Найбільша ділова активність це звісно міста. І основне споживання енергії це також міста. До того ж потрібно відзначити, що зросла не тільки частка споживання енергії містами у загальнодержавному споживанні.

Мета дослідження – простежити вплив на якість електричної енергії мегаполісів різних факторів: технічних і економічних.

Основні матеріали досліджень. Значно підвищилися вимоги до якості електричної енергії. Слід зазначити, що енергетична система міст розвивалася більш динамічно і тому така система має більше розгалуження. З точки зору якості електричної енергії це і перевага і недолік. В більшості випадків для електропостачання міст використовуються мережі закладені в різні часи. Так інколи в експлуатації залишаються обладнання і прилади які були створені навіть в різні епохи. Хоча електроенергетична система має і відповідне дублювання і відповідні системи підтримки надійності, але підтримання в якісному стані різних за поколінням систем дуже складно виконати на практиці. Підвищення якості електричної енергії вимагають споживачі. Мешканці міст більш заможні і можуть дозволити використовувати сучасні електроприлади для яких якість електричної енергії важлива. В той же час міжнародні нормативи постійно підвищують критерії якості електричної енергії. Україна прагне увійти в Європейську енергетичну систему, тому потрібно узгоджувати норми, правила, технологічні норми. Теперішні норми включають певний контроль рівня якісних показників. Хоча тільки контроля замало. Потрібні і економічні механізми які б стимулювали підвищення якості електричної енергії. Такі рішення перспектива майбутнього, бо під руйнівними обстрілами ворогом енергетичної системи не тільки неможливо забезпечити якісні показники, а підчас проблематично забезпечити наявність електрики в мережі. Але тим не менш потрібно зрозуміти, що розвиток приладів обліку електричної енергії не стоїть на місці і вже створені такі прилади, що можуть одночасно і проводити облік обсягу електричної енергії і в той же час фіксувати її якісні параметри. Це наприклад: Електролічильник Енергомера CE 303-U AR S35 543-JAVZ 3x230/400В 5-10А, A+R+, багатофункціональний [4] і інші. Тепер при встановленні такого приладу обліку з’являєтеся факт фіксації неякісної електричної енергії, що призведе до юридичних позивів до енергетичних компаній. Яким чином можна забезпечити якість електричної енергії в складній системі при наявності контролю за відповідністю параметрів споживачем. Вихід вбачається наступний, що при заходах по підвищенню якості мають бути задіяні не тільки виробники і постачальники електричної енергії, але й самі споживачі. Відповідно до дослідів [5], зазначається, що в погіршення якості електричної енергії безпосередню участь приймає споживач електричної енергії.

Висновок. Покращити якість електричної енергії суто технічними заходами вкрай складне завдання. Тому пропонується задіяти ще й економічні механізми. Такі заходи мають стимулювати до підвищення якості електричної енергії компанії що постачають електричну енергію з одного боку, а з іншого стимулюватиме споживачів до не погіршення якості за рахунок використання тільки сертифікованих електроприладів і притримуватися регламенту записаному в договорі на споживання електричної енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Posas, Luis (2008) "Revisiting the Overurbanization Theses: A Test of a Theoretically Inclusive Model Using Path Modeling with LISREL," Great Plains Sociologist: Vol. 19 : Iss. 1 , Article 4. Available at: https://openprairie.sdstate.edu/greatplainssociologist/vol19/iss1/4

2. CITIES IN EUROPE AND CENTRAL ASIA UKRAINE. Режим доступу: https://documents1.worldbank.org/curated/en/294341511956937400/pdf/121735-BRI-P154478-PUBLIC-Ukraine-Snapshot-Print.pdf

3. Дані досліджень всесвітнього банку. Режим доступу: https://tradingeconomics.com/ukraine/urban-population-percent-of-total-wb-data.html

4. https://elmisto.com.ua/ua/p36127669-elektroschetchik-energomera-303.html

5. Качество электрической энергии. Том2. «Контроль качества электрической энергии» / [Гриб, О. Г., Сокол, Е. И., Жаркин, А. Ф., Васильченко, В. И., & Тесик, Ю. Ф.], Под ред. Гриба О. Г. – Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2014. – 244 с.

УДК 621.31

ЗАХОДИ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Попадченко С. А., ст. викл., e-mail: svanp111@ukr.net
Дудніков С. М., к.т.н., доц., e-mail: dydnikov@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Підвищення надійності електропостачання – це проблема, яка є актуальною в наші дні. У цій статті наведено заходи, які можна вжити для посилення надійності електропостачання. Незважаючи на те, що кількість аварій в електросистемах щорічно досягає значних показників, питання надійності електроенергетичних систем стає дедалі актуальнішим. Постійно зростаюча потреба в електроенергії та її безперебійному постачанні потребує безперервного вдосконалення методів прогнозування, проектування, будівництва, монтажу та експлуатації систем з урахуванням принципу надійності та раціонального використання ресурсів, що виділяються на її забезпечення.

Мета дослідження – обґрунтувати шляхи реалізації надійного електропостачання.

Основні матеріали досліджень. Надійність системи – це її здатність стабільно функціонувати в заданих умовах, зберігаючи задані параметри та характеристики протягом тривалого часу, незалежно від умов експлуатації, зберігання та транспортування. Ця проблема зачіпає всі етапи життєвого циклу мережі: від планування та проектування до будівництва та експлуатації. Для забезпечення стабільного електропостачання споживачів потрібно знати властивості надійності всіх елементів мережі. Надійність електричних мереж залежить від багатьох факторів, таких як: конструкція опор, тип і марка проводів і кабелів, термін служби, кліматичні умови та ін. Нормативні документи встановлюють вимоги до надійності різних типів мереж, зокрема живильних, розподільчих, промислових, міських та сільських. Вони визначають правила резервування, кількість ланцюгів та трансформаторів, схеми підключення тощо. Особлива увага приділяється споживачам I категорії, котрим перебої в електропостачанні можуть призвести до катастрофічних наслідків, які не піддаються економічної оцінки. Для оцінки надійності мереж, що живлять споживачів I та II категорії, використовуються такі показники: частота відмов (середня кількість відмов на рік), середній час відновлення електропостачання та ймовірність безвідмовної роботи протягом року. Підвищення надійності електричних мереж – це комплексний підхід, спрямований на ідентифікацію слабких ланок, з найбільшим ризиком збоїв. Та використання надмірності. Здійснити резервування з додатковими джерелами енергії та обладнання для забезпечення безперебійної роботи у разі відмови. Здійснити поліпшення конструкцій та матеріалів з використанням більш надійних матеріалів та конструкцій обладнання. Налагодити регулярне технічне обслуговування, профілактичні роботи, спрямовані на запобігання несправностям. Покращити системи захисту та автоматизації, особливо автоматичне відключення пошкоджених ділянок мережі та перемикання на резервні джерела. Планомірно запроваджувати застосування компенсуючих та регулюючих пристроїв для забезпечення стабільної якості напруги. Для оптимізація розподільчих мереж сконструювати раціональні схеми з метою ефективного підключення підстанцій та розподільчих пристроїв. В зв’язку з сучасними викликами постійного порушення електропостачання велику увагу приділяти автоматизації всіх процесів для впровадження автоматичних систем керування та захисту, включаючи пристрої АВР (автоматичне включення резерву). І в зв’язку з цим здійснювати збільшення автоматичних комутаційних апаратів для швидкої та ефективної реакції на аварійні ситуації. Перераховані вище методи вимагають значних матеріальних витрат.

Велике значення має вдосконалення схем розподільчих мереж та розподільчих пристроїв підстанцій. Для надійного електропостачання різних категорій споживачів потрібні комплексні заходи. Ключовими елементами такої стратегії є скорочення радіусів розподільчих ліній, що дозволяє знизити ризик перевантаження та пошкоджень, зменшуючи

навантаження на окремі джерела живлення, Забезпечення двостороннього живлення магістральних ліній, так як використання кількох джерел живлення забезпечує резервування та гарантує безперервність подачі електроенергії у разі аварії на одному з них. Улаштування секціонування та автоматичного повторного включення, що поділяють мережі на автономні ділянки та автоматичне відновлення живлення після збоїв, що в свою чергу підвищують її стійкість. А зменшення радіусів дії електричної мережі також призводить до зниження ймовірності пошкоджень, що, своєю чергою, мінімізує втрати електроенергії. Двостороннє живлення мережі, особливо магістральних ліній, значно підвищує надійність електропостачання, особливо споживачів, чиє живлення може бути порушено. Це досягається шляхом об'єднання двох незалежних ділянок мережі, які працюють у нормальному режимі. Якщо один із джерел живлення відключається, інший автоматично бере на себе подачу енергії до пошкодженої ділянки. Для перемикання між джерелами використовується спеціальний вимикач, який вмикається при зникненні живлення з одного боку. Проте, двостороннє живлення має недолік: обидві лінії мають бути розраховані на подвійне навантаження в аварійному режимі, що може бути неекономічним у районах з розкиданими споживачами. Більш ефективним рішенням є секціонування мереж у поєднанні з автоматичним повторним включенням пошкоджених ділянок. Ключовим фактором у створенні ефективного управління надійністю електричних мереж є постійне впровадження інновацій, що сприятиме прогресивному розвитку галузі. Одним із найбільш ефективних способів підвищення надійності електропостачання є встановлення резервних джерел живлення. Вони можуть бути різними, наприклад дизель-генератори, газові турбіни або сонячні панелі. Акумулятори також можуть використовуватись для підвищення надійності електропостачання. Вони дозволяють зберігати енергію протягом певного часу, що дозволяє забезпечити безперервність роботи обладнання у разі вимкнення живлення. Все це забезпечує безперервну подачу електроенергії у разі відключення основного джерела живлення. Розвиток системи відновлюваної енергетики, таких як сонячна та вітрова енергія, може допомогти підвищити надійність електропостачання за рахунок використання екологічно чистих джерел енергії. Це дозволить знизити залежність від традиційних джерел енергії та зменшити викиди парникових газів. Поліпшення якості електроенергії може підвищити надійність електропостачання шляхом зменшення перешкод та спотворень у мережі. Це може бути досягнуто за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад високочастотних фільтрів. Одним із найефективніших способів підвищення надійності електропостачання є використання сучасних технологій. Наприклад, застосування інверторних перетворювачів дозволяє значно зменшити втрати енергії під час передачі електроенергії. Крім того, використання інтелектуальних систем керування дозволяє автоматично регулювати навантаження залежно від потреб споживачів та запобігати перевантаженню. Впровадження сучасних гібридних резервних джерел живлення надасть можливість безперебійного електропостачання. Акумулятори також можуть використовуватись для підвищення надійності електропостачання. Вони дозволяють зберігати енергію протягом певного часу, що дозволяє забезпечити безперервність роботи обладнання у разі вимкнення живлення. Все це забезпечує безперервну подачу електроенергії у разі відключення основного джерела живлення.

Висновки. Для надійного електропостачання потрібні комплексні заходи які потребують постійного впровадження інновацій, що сприятиме прогресивному розвитку галузі, з приєднанням ВДЕ та використанням інтелектуальних систем керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Єгорова О. Ю. Комплексне забезпечення надійності і якості електропостачання у сільських розподільних мережах /О. Ю. Єгорова // Енергетика та комп’ютерно-інтегровані технології в АПК. – 2016. – № 2. – С. 41–43.

2. Севастюк І. М., Трач І. В. Поліпшення якості електроенергії у розподіленій енергосистемі малої потужності, працюючій паралельно з енергосистемою // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1. – С. 50–53.

УДК 621.3.019.3

КОМПЕНСУЮЧІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Середа А. І., к.т.н., доц., e-mail: ais66@btu.kharkov.ua
Дудніков С. М., к.т.н., доц., e-mail: dydnikov@btu.kharkov.ua
Зубарєв Д. В., магістр, e-mail: zubarev907@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Перед сучасною енергетикою стоїть ряд важливих проблем потребують уваги.

Однією з таких проблемних тем є дотримання балансу реактивних потужностей, а також їх компенсація.

На відміну від активної потужності, джерелами якої є не тільки генератори, реактивна потужність може генеруватися повітряними кабельними лініями електропередачі [1].

Метою дослідження є генерування лініями електропередачі реактивна енергія може порушити баланс потужностей.

І що найважливіше, точно визначити рівень генерованої потужності неможливо, через що потужність компенсуючи доводиться вибирати з великим запасом, що призводить до великих економічних витрат.

З іншого боку, не можна покладатися на усереднені або наближені значення в питанні компенсації, оскільки порушення балансу реактивних потужностей може призвести до наступного:

1) велике завантаження генераторів по реактивній потужності викликає їх перевантаження по струму;

2) нестача реактивної потужності в енергосистемі призводить до падіння напруги у споживачів;

3) передача великих обсягів реактивної потужності привід до збільшення втрат активної потужності.

Основні матеріали досліджень. Таким чином значення заходів щодо компенсації реактивної потужності не можна недооцінювати.

Однією з сучасних розробок в цій області є так Статки (статичний синхронний компенсатор).

Завданням яких є поліпшення якості електроенергії та підвищення ефективності систем її передачі та розподілу за рахунок компенсації реактивної потужності, регулювання напруги та підвищення стійкості роботи енергосистем.

Порівняно з СТК та іншими пристроями компенсації реактивної потужності СТАТКОМ має ряд переваг:

1) кращі динамічні характеристики;

2) можливість підтримки номінального ємнісного вихідного струму, при низькій напрузі системи, що, в результаті, забезпечує більш високу динамічну стійкість передачі в порівнянні з СТК;

3) завдяки високій частоті перемикання приладів, СТАТКОМ може здійснювати активну фільтрацію гармонійних струмів навантаження;

4) потрібно менше місця для установки (приблизно в два рази в порівнянні з СТК);

5) менший рівень активних втрат.

СТАТКОМ являє собою кероване джерело напруги з внутрішнім опором, практично рівним нулю.

Його підключення до мережі проводиться через лінійний реактор (рис. 1).

Який забезпечує перетворення різниці напруг мережі та УІН у вихідний струм СТАТКОМ, тобто перетворення джерела напруги в джерело струму.

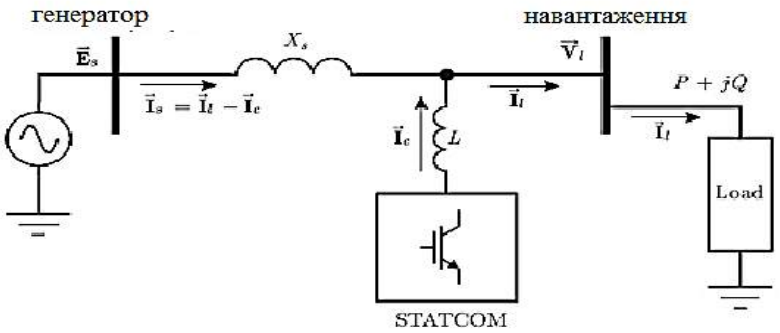


Рисунок 1 – Однолінійна схема підключення СТАТКОМ до мережі

Векторна діаграма напружень, що ілюструє режими роботи СТАТКОМ, показана на рис. 2.

У режимі споживання реактивної потужності вихідна напруга перетворювача менше напруги лінії і знаходиться з ним у фазі.

У режимі генерації – вихідний напруга перетворювача більше напруги на лінії і так само в фазі з ним.

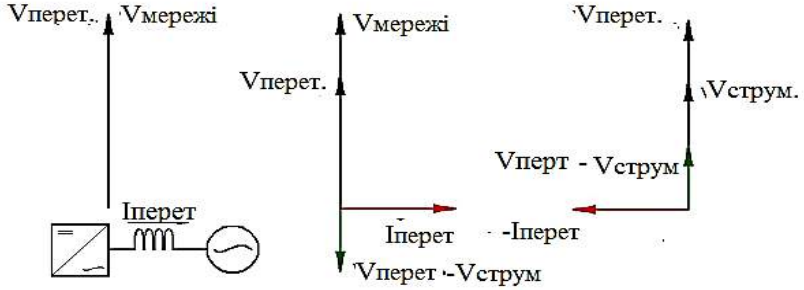


Рисунок 2 – Векторна діаграма напружень у різних режимах роботи СТАТКОМ

Висновок. Таким чином, виконуючи роль транзисторного перетворювача напруги СТАТКОМ здатні в автоматичному режимі регулювати рівень реактивної потужності в мережі, тим самим підтримуючи баланс потужностей.

Дана розробка заснована на принципах силової електроніки, що в майбутньому може послужити основою для інтелектуальних енергетичних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Клименко В.М., Чепурний О.О**.** Електропостачання промислових підприємств. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 356 с.

2. Сергієнко О.М. Якість електричної енергії та заходи її забезпечення. – Львів: Львівська політехніка, 2016. – 240 с.

3.Трофимчук О.М., Шкарупа О.В**.** Електричні мережі та системи. – Київ: КНУБА, 2018. – 420 с.

УДК 621.3.019.3

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВІД ВІДМОВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ У СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Середа А. І., к.т.н., доц., e-mail: ais66@btu.kharkov.ua
Тимченко В. П., магістр, e-mail: timchenko.viktoriya@lbres.com.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Визначено ступінь впливу різних високовольтних вимикачів надійність електропостачання та безвідмовність роботи розподільчих підстанцій. Для лінії 10 кВ проведено оцінку економічних збитків споживача та наслідків на лінії від перерв електропостачання. Визначено залежність впливу відмов високовольтних вимикачів на збитку від недовідпуску електроенергії, часу перерви в електропостачанні та недовипуску продукції у споживачів. Для підвищення надійності електропостачання споживачів доцільним є вдосконалення конструкції та застосування інноваційних методів технічного обслуговування маслених вимикачів.

Метою дослідження є процес старіння і зносу систем передачі і розподілу електроенергії становить не менше 60%. При існуючих проблемах в експлуатації маслених вимикачів необхідно підвищення їх експлуатаційних характеристик, що збільшують надійність, термін служби та ремонтопридатність у разі виникнення аварійних ситуацій.

Основні матеріали досліджень. Метою роботи є підвищення надійності електропостачання сільських споживачів на основі виявлення та аналізу причин відмов електрообладнання та обґрунтування заходів щодо підвищення експлуатаційних характеристик масленого вимикача ВМП-10.

Для реалізації поставленої мети необхідно досліджувати причини і склад відмов різних видів високовольтних вимикачів 10 кВ, а також визначити ступінь впливу їх відмов на час перерви в електропостачанні споживачів і величину виникаючих збитків. Для отримання повної інформації, поряд зі збором і обробкою статистичних даних і проведення розрахунків, використані експертні оцінки, оброблені відповідним чином [1, 2].

На підставі дослідження та кількісного співвідношення відмов електрообладнання розподільних підстанцій з урахуванням коефіцієнтів компетенції експертів встановлено, що маслені вимикачі 10 кВ є основною причиною перерв в електропостачанні споживачів в зв'язку з частими відмовами і низькою надійністю. Показники щодо відмов високовольтних вимикачів 10 кВ представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Показники щодо відмов високовольтних вимикачів 10 кВ

Вигляд вимикача	Масляний	Єлегазовий	Вакуумний
Склад обладнання %	52	32	16
Склад відмов %	68	20	12
Відмови на одиницю вимикань.	1,35	0,65	0,75

На підставі проведених досліджень встановлено, що на одиницю вимикачів менш надійними є маслені вимикачі. Будучи найбільш поширеними вимикачами, використовуваними на підстанціях, вони в той же час менш надійні в роботі, що свідчить про необхідності вдосконалення як самої конструкції, так і застосування інноваційних методів технічного обслуговування маслених вимикачів. Близько 70% випадків пошкоджень вимикачів пов'язано з непогашенням дуги, перекриттями всередині бакової ізоляції, пошкодженням вводів.

Решта пошкодження пов'язані з порушенням контактної системи, поломками ізоляційних частин і деталей механізму управління вимикачем. В практиці експлуатації

високовольтних вимикачів виділяють три основних напрямки розвитку аварії вимикачів ВМП-10: утворення дуги 30%, пошкодження і відгортання вводів і контактних з'єднань 12%, пошкодження механізмів і апаратури вимикання 42%, інші причини 18%. Для оцінки впливу відмов ВМП-10 на рівень надійності електропостачання.

В якості критерію оцінки надійності електропостачання обрано показник недовідпуску електроенергії. Мінливість показника потоку відмов окремих елементів пов'язане зі старінням і великим зносом обладнання [3]. Для визначення недовідпуску електроенергії прийнято варіант розрахунку, що дозволяє врахувати час перерви електропостачання.

Недовідпуск електроенергії за рік, через відмови елементів сільської електричної мережі, характеризує рівень надійності системи електропостачання.

Для більш об'єктивної оцінки необхідно визначити економічний збиток від перерв в електропостачанні, що характеризує інтегральні властивості надійності системи, включаючи тривалість перерв електропостачання та їх кількість за рік.

При розрахунках надійності електропостачання на електрообладнання підстанції припадає 2 години перерви в електропостачанні на рік. Виходячи з наявних даних щодо відмов електрообладнання розподільних підстанцій, визначено час перерви, що припадає на вимикачі 10 кВ, складове 0,84 години, а при виникненні електричної дуги в масленому вимикачі 0,25 години.

На практиці ці показники перерви в електропостачанні можуть становити 6-8 годин, а у разі вигорання комірки перевищувати цей час.

У разі виникнення електричної дуги тяжкість аварії залишається однаковою для всіх видів вимикачів, за винятком масленого, так як тут відбувається загоряння великого об'єму масла, то середній час на відновлення електропостачання може становити в окремих випадках 14-18 годин.

Час перерви в електропостачанні у разі важких аварій, пов'язаних з високовольтними вимикачами 10 кВ становить 8 годин – маслений, 6 годинника – елегазів, 5 годинника – вакуумний. Так як відсоток аварій через високовольтних вимикачів становить 42%, то усереднене час перерви в електропостачанні від їх відмов становить, у годинах: 3,36 – маслений, 2,52 – елегазів, 2,1 – вакуумний.

Виникнення дуги з наступним міжфразним замиканням тягне за собою великий недовідпуск електроенергії і продукції на підприємствах.

Одним із способів запобігання виникнення електричної дуги та важкої аварійної ситуації є вдосконалення конструкції маслених вимикачів 10 кВ і його дугогасної камери, а також застосування інноваційних методів технічного обслуговування на основі діагностування визначальних параметрів масляних вимикачів.

Висновок. Визначено ступінь впливу високовольтних вимикачів на надійність електропостачання та безвідмовність роботи розподільних підстанцій з урахуванням складу застосовуваних високовольтних вимикачів та кількості їх відмов за видами вимикачів. Визначено залежність впливу відмов високовольтних вимикачів на величину збитки від недовідпуску електроенергії, часу перерви в електропостачанні і недовипуску продукції на виробництвах. Для підвищення надійності електропостачання доцільним є вдосконалення конструкції та застосування інноваційних методів технічного обслуговування маслених вимикачів з урахуванням економічного критерію за витратами на експлуатацію та матеріальних втрат від відмов.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кириленко О.В., Бєляєв В.М**.** Експлуатація та технічне обслуговування електричних мереж. – Київ: Либідь, 2018. – 368 с.

2. Богданов В.Г., Мельник О.О. Релейний захист та автоматика електроенергетичних систем. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 420 с.

3. Токар О.І. Економіка енергетики: оцінка збитків від порушень електропостачання. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 256 с.

УДК 621.3.019.3

АНАЛІЗ ВТРАТИ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Середа А. І., к.т.н., доц., ais66@btu.kharkov.ua
Бондар С. О., магістр, serzhbondar0@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. На основі статистичного аналізу показано доцільність мінімізації втрат реактивної енергії в умовах експлуатації для підвищення ефективності функціонування розподільчих електричних мереж.

Здійснено аналіз схемно-режимної ситуації та структурний аналіз втрат реактивної енергії на прикладі розподільчої електричної напруги 6кВ. Виявлено осередки підвищених втрат активної та реактивної енергії. Розглянуто ефект від мінімізації втрат реактивної енергії для електричних мереж.

Метою дослідження є особливістю методів статистичного аналізу є їх комплексність, обумовлена формами статистичних закономірностей, і навіть складністю процесу статистичних досліджень.

Однак ми хочемо поговорити саме про такі методи, які може застосовувати кожен, причому робити це ефективно та із задоволенням. Втрати реактивної електроенергії значною мірою впливають на режими роботи електричної мережі, надійність та якість електропостачання, проте їх мінімізацією під час експлуатації практично не займаються.

Основні матеріали досліджень. Однією з причин ситуації є відсутність пристрою, що показує доцільність оптимізації їх рівня. При передачі електроенергії від джерел до споживачів частина виробленої на електростанціях енергії витрачається в електричних мережах на нагрівання провідників та магнітопроводів, створення електричних та магнітних полів і є необхідною технологічною витратою на її передачу. Під технологічною витратою на її передачу. Під втратами потужності слід розуміти втрати енергії за інтервал часу, кратний періоду. Розрізняють втрати активної потужності та втрати реактивної потужності.

З огляду на об'єктивні причини, під втратами енергії надалі слід розуміти втрати активної енергії.

Усі втрати потужності в елементах електроенергетичної системи прийнято поділяти на три види: Звітна величина втрат електроенергії в енергосистемі – різниця між кількістю електроенергії, відпущеної в мережу (електричними станціями, енергосистемами тощо) та величиною реалізованої електроенергії (сума сплачених рахунків від споживачів).

Розрахункова (технічна) величина втрат визначається за відомими параметрами режимів роботи мережі та параметрами елементів (витрата електроенергії на нагрівання та створення електромагнітних полів)комерційні втрати різниця між звітними та технічними втратами (недосконаліть системи обліку, неодночасність та неточність зняття показань, похибка приладів, розкрадання та структура втрат потужності та електроенергії)втрати холостого ходу, як в лініях, так і трансформаторах не залежать від потужності навантаження і визначаються конструктивними особливостями цих елементів 6 мережі і напругою.

Під втратами холостого ходу розуміють втрати у поперечних елементах системи (провідності)питомі значення втрат потужності холостого ходу для ліній електропередачі та трансформаторів наводяться в довідниках (дивися схеми заміщення). Втрати холостого ходу у трансформаторах та автотрансформаторах можуть досягати суттєвих значень. Тому при розрахунках втрат у трансформаторах та автотрансформаторах слід враховувати як втрати у опорах обмоток (навантажувальні втрати), так і втрати (холостого ходу).

Допустимі тривалі потужності для неізольованих сталеалюмінієвих проводів марки АС з урахуванням поправочних коефіцієнтів на температуру навколишнього повітря (МВт).

Вважається, скільки енергії відбувається марно протягом періоду часу використовуваної потужності. Ми можемо побачити споживану електроенергію безпосередньо, помноживши споживану потужність на загальний час.

Втрати реактивної енергії призводять до зростання струмового навантаження елементів мережі, а, отже, збільшення втрат активної енергії, підвищеного рівня втрат напруги у вузлах та мережі в цілому. Це випливає із законів електротехніки.

Що у мережах низької напруги бачимо великі втрати, у мережах високої напруги втрати трохи менше. При синтезі ланцюгів, що задовольняють жорстким вимогам, через розкид параметрів елементів виникає проблема визначення їх допусків.

Це завдання актуальне при аналізі параметрів ланцюгів, при виборі відповідної еквівалентної схеми та оптимізації в процесі структурного (ітераційного) синтезу, а також при синтезі систем автоматичного управління та ланцюгів з регульованими параметрами.

Технічне переозброєння сільського господарства, впровадження високотехнологічних процесів отримання сільгосппродукції, зростання забезпеченості сільського населення електропобутовими приладами вимагають достатньої кількості електричної енергії відповідної якості одним із показників якості електроенергії, що регламентуються відхиленням напруги, яке не повинно перевищувати в нормальному режимі ±5% (для освітлення – 2,5%), а після аварійному режимі ±10%.

У точках загального приєднання до мереж напругою 0,4/ 10кВ відхилення напруги розраховується з урахуванням втрат напруги в елементах мережі (лінії, трансформатори та ін.). Аналізуючи дані, можна зробити такі висновки, що рівні напруги повісилися після введення джерел реактивної потужності.

Наприкінці найдовшої лінії напруга підвищилася з 206кВ на 220кВ, на 6,4%. А в середньому напруга підвищилася на 5,6% і необхідності забезпечувати допустиме відхилення напруги на затискачах струмових приймачів в режимах найбільшого і найменшого завантаження.

Рівень напруги в центрі живлення при цьому регулюється з урахуванням забезпечення напруги, що нормується, у наближеннях споживачів. Регулювання рівня напруги в центрі живлення та у споживача здійснюється шляхом зміни коефіцієнта трансформації за допомогою систем перемикання витків обмоток трансформатора.

Для такого способу регулювання напруги потрібно проведення спеціального техніко-економічного аналізу.

При подачі електроенергії споживачам необхідно забезпечити безперебійну, надійну та якісну електроенергію. Але пізніше цього процесу недостатньо. В даний час розробляються заходи, які максимально полегшують вирішення цього питання.

Висновок. Електрична енергія, що передається електричними мережами, споживає частину її для свого використання. Частина електроенергії, що виробляється, використовується для створення електричних і магнітних полів, в електричних мережах, а для її передачі необхідні технологічні витрати.

Процес розрахунку споживаної електроенергії та потужності дуже трудомісткий. У цей період важливим питанням вважається визначення допустимого рівня втрат за економічними критеріями, а також визначення визначень електроенергії, нормування втрат.

Різниця між високовольтними та низьковольтними конденсаторами, наступна: напругою 6-10кВ до 15%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.

1. Діденко О. В. Моделювання та оптимізація електричних мереж розподільного типу з урахуванням втрат потужності // Енергетика та електрифікація. – 2021. – №2. – С. 33–39.

2. Ємельянов В. В., Кучер В. М. Розрахунок електричних мереж напругою до 35 кВ.– Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 180 с.

3. Лапшин В. І., Соловйов О. І. Втрати електроенергії в електричних мережах: методи зниження та оптимізація режимів. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2020. – 256 с.

УДК 621.316

КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНФРАСТРУКТУРА РОЗУМНОЇ ЕНЕРГОМЕРЕЖІ SMART GRID

Сорокін М. С., доц., e-mail: sorokin.ekt@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Розумна мережа (Smart Grid) є новим поколінням стандартних енергомереж. Комунікаційна інфраструктура має ключове значення для ефективного функціонування сучасних розумних мереж. Використання комунікаційних технологій дозволяє зменшити споживання енергії, забезпечити оптимальну роботу мережі та координувати взаємодію всіх компонентів Smart Grid від виробництва до кінцевого споживача.

Метою дослідження є огляд існуючих комунікаційних технологій, таких як ZigBee, WLAN, мобільний зв'язок, WiMAX та Power Line Communication (PLC), їх застосування в розумних мережах, а також переваги та недоліки кожної з них.

Рисунок 1 – Схематична структура комунікаційної інфраструктури Smart Grid

Комунікаційна інфраструктура розумної мережі (Smart Grid) може базуватися на трьох типах мереж: Home Area Network (HAN), Neighborhood Area Network (NAN) та Wide Area Network (WAN). Схематична структура комунікаційної інфраструктури Smart Grid на основі цих мереж наведена на рис. 1.

HAN розгортається та працює на невеликій території (десятки метрів), зазвичай у будинку або невеликому офісі. HAN має відносно низьку швидкість передачі даних порівняно з іншими двома типами мереж – сотні біт на секунду (bps). У типовому варіанті HAN включає широкосмугове підключення до Інтернету, яке спільно використовують кілька користувачів через дротовий або бездротовий модем. Це дозволяє обмінюватися інформацією та ділитися ресурсами між комп'ютерами, мобільними та іншими пристроями через мережеве з'єднання.

У реалізації Smart Grid усі енергоспоживаючі пристрої розумного дому та розумні лічильники можуть бути підключені до HAN. Дані пристроїв збираються та передаються через HAN до розумних лічильників, що забезпечує ефективніше управління енергоспоживанням у домі. HAN можна реалізувати за допомогою технологій ZigBee або Ethernet.

NAN розгортається та працює на території сотень метрів, що зазвичай охоплює кілька будівель у місті. Кілька HAN можуть бути підключені до одного NAN, який передає дані про спожиту енергію від кожного будинку. NAN забезпечує передачу цих даних до локальних центрів обробки даних (Local Data Centers, LDC) для зберігання. Збереження даних є

важливим для нарахування платежів споживачам та для аналізу енергетичних патернів споживання. Швидкість передачі даних у NAN може досягати до 2 Кбіт/с. NAN можна реалізувати за допомогою технологій PLC, Wi-Fi або мобільного зв'язку.

WAN охоплює великі території – десятки кілометрів – і складається з кількох NAN та LDC. Крім того, через WAN здійснюється комунікація всіх компонентів Smart Grid, включаючи операторський центр управління, основні та відновлювані джерела енергії, передачу та розподіл електроенергії. WAN має дуже високу швидкість передачі даних – до кількох Гбіт/с. Для реалізації WAN можуть використовуватися Ethernet, WiMAX, 3G/LTE та мікрохвильові канали передачі.

Серед основних технології, що застосовуються в Smart Grid слід визначити:

ZigBee базується на стандарті IEEE 802.15. Він використовується в застосуваннях, які потребують низької швидкості передачі даних, тривалого часу роботи від батареї, низької вартості та безпечної мережі. До таких застосувань належать бездротові вимикачі освітлення, електролічильники з індикаторами для домашнього використання, системи управління дорожнім рухом та інше споживче та промислове обладнання, яке потребує короткочасної бездротової передачі даних на відносно низьких швидкостях.

ZigBee дозволяє підключення до 60 000 пристроїв у межах однієї мережі. Швидкість передачі даних коливається від 20 до 250 Кбіт/с, що найкраще підходить для періодичної або короткочасної передачі даних або сигналів від сенсорів та пристроїв введення. Технологія ZigBee передбачає простішу та дешевшу реалізацію порівняно з іншими бездротовими персональними мережами (WPAN), такими як Bluetooth або Wi-Fi. Мережі ZigBee захищені симетричним шифруванням 128 біт.

Існує спеціальний додаток "ZigBee Smart Energy", який дозволяє інтегрувати розумні лічильники та інші пристрої до мережі ZigBee. Використання цього додатку дає змогу розумним лічильникам збирати інформацію від підключених пристроїв та керувати ними, а споживачам — переглядати своє споживання енергії в реальному часі. Це також забезпечує більш ефективне використання енергії та динамічне ціноутворення в режимі реального часу.

Переваги ZigBee в Smart Grid: низька вартість, компактні розміри, невелика пропускна здатність. Недоліки: мала батарея, що обмежує тривалість роботи, обмежена пам'ять, низька швидкість передачі даних та обмежена обчислювальна здатність. Робота на неліцензованих частотах 868 МГц та 2,4 ГГц може створювати перешкоди для Wi-Fi, Bluetooth та мікрохвильових сигналів.

Бездротова локальна мережа (WLAN) забезпечує зв'язок між двома або більше пристроями, використовуючи технології spread-spectrum або OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), та зазвичай підключається до Інтернету через точку доступу. Це дозволяє користувачам переміщатися в межах покриття та залишатися підключеними до мережі. Сучасні WLAN переважно базуються на стандартах IEEE 802.11, відомих під брендом Wi-Fi. WLAN стали популярними для використання в будинках завдяки простоті встановлення, а також у комерційних приміщеннях для забезпечення бездротового доступу для клієнтів. WLAN легко інтегрувати в Smart Grid через його широке розповсюдження у світі. WLAN працює на частотах 2,4–3,5 ГГц.

Переваги WLAN: низька вартість, велике розповсюдження у світі, підтримка технології plug-and-play.до недоліків можна віднести: висока ймовірність перешкод від інших пристроїв, що працюють на тих самих частотах.

Мобільні мережі широко розгорнуті в більшості країн і мають добре розвинену інфраструктуру. Вони забезпечують високі швидкості передачі даних – до 100 Мбіт/с, що дозволяє використовувати їх для комунікації між компонентами та пристроями Smart Grid.

Існують різні технології мобільного зв'язку: GSM, GPRS, 2G, 3G, 4G та WiMAX. Найцікавішою для Smart Grid є технологія WiMAX, яка працює на частотах 2,5 та 3,5 ГГц, забезпечує швидкість передачі даних до 70 Мбіт/с та покриття до 50 км. Чіпи WiMAX інтегруються безпосередньо у розумні лічильники, що використовуються у Smart Grid.

Переваги мобільних мереж це існуюча інфраструктура з широким покриттям, високі швидкості передачі даних, наявність алгоритмів безпеки, вже реалізованих у мобільному зв'язку. Головним недоліком мобільних мереж є спільними для багатьох користувачів і не виділені повністю для комунікацій Smart Grid, що може створювати проблеми в умовах аварійної ситуації в мережі.

Power Line Communication (PLC) дозволяє обмінюватися даними між пристроями через електричні лінії передачі. PLC реалізується шляхом додавання модуляційного несучого сигналу до силових кабелів. Швидкість передачі даних у системах, що використовують OFDM, може досягати кількох Мбіт/с.

Швидкості передачі та максимальна дальність залежать від стандарту PLC. Низькочастотні сигнали (приблизно 100–200 кГц) на високовольтних лініях можуть передавати один-два аналогові голосові канали або телеметричні та керуючі сигнали зі швидкістю кількасот біт/с; проте такі лінії можуть простягатися на багато кілометрів. Вищі швидкості передачі зазвичай забезпечують менший радіус дії.

Різні типи PLC використовують різні частотні діапазони. Оскільки система електропостачання спочатку призначалася для передачі змінного струму на типових частотах 50 або 60 Гц, проводка має обмежену здатність передавати сигнали високої частоти. Це ускладнює встановлення високочастотного зв'язку через лінії живлення через затухання сигналу. Проблеми поширення сигналу є обмежувальним фактором для PLC.

Крім того, можливі перешкоди від високочастотних гармонік, що виникають унаслідок нелінійних навантажень у мережі (випрямлячі, інвертори тощо). Для подолання цієї проблеми рекомендується використання сучасних активних фільтрів.

У застосуванні Smart Grid PLC використовується для зв'язку в Neighborhood Area Network (NAN), забезпечуючи підключення між розумними лічильниками та локальним концентратором даних (Local Data Concentrator, LDC). Проте комунікація на рівні Wide Area Network (WAN), від LDC до інших компонентів Smart Grid (операторський центр, генерація, передача та розподіл), здійснюється через мобільні мережі.

Головна перевага PLC наявна, широко розповсюджена інфраструктура, що знижує витрати на встановлення. Серед недоліків слід зазначити наявність високих гармонік у лініях електропередачі, які створюють перешкоди для сигналів, та обмежена частотна здатність передачі даних.

Майбутня розумна мережа (Smart Grid) базується на поєднанні традиційної енергомережі з сучасними технологіями розумного обліку, дистанційного моніторингу та управління всіма ключовими компонентами та обладнанням. Успішність впровадження Smart Grid безпосередньо залежить від надійної, стійкої та безпечної комунікаційної системи з високою пропускною здатністю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гюнгьор В. Ч., Сахін Д., Кочак Т., Ергют С., Буччелла К., Чечаті К., Ханкке Г. П. *Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/305802237_Smart_Grid_Communication_Technologies (дата звернення: 27 жовтня 2025 р.).

2. Товт, Ф. Ф. Блокчейн технологій у децентралізованих системах енергопостачання [Текст] / Ф. Ф. Товт ; наук. керівник М. С. Сорокін // Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XXI Міжнар. форуму молоді, Держ. біотехнол. ун-т, 10-11 квіт. 2025 р. – Харків: ООО «ПромАрт», 2025. – С. 290-291.

3. Міжнародний стандарт IEEE 1547:2018 «Взаємозв'язок та взаємодія розподілених енергоресурсів з відповідними інтерфейсами електроенергетичних систем» — 2018. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://standards.ieee.org/standard/1547-2018.html (дата звернення: 12.10.2025).

УДК 621.3.019.3

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ОРГАНІЗАЦІЙНИМИ ЗАХОДАМИ

Шаповалов Д. О., магістр, e-mail: shapovalovdavid54@gmail.com
Трунова І. М., к.т.н., доц., e-mail: trunova_iryna@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Надійність електрообладнання є основою раціонального використання електроенергії, на що спрямований енергоменеджмент. Надійність електродвигунів в технологічних процесах сільськогосподарського виробництва забезпечується правильним вибором електродвигунів відповідно до умов експлуатації згідно вимог ПУЕ [1] та якісною технічною експлуатацією електродвигунів. При цьому слід аналізувати та вдосконалювати алгоритм розрахунків обґрунтування служби технічної експлуатації електродвигунів [2], так як це впливає на необхідну кількість обслуговуючого персоналу та на якість технічної експлуатації електродвигунів. Тому аналіз та вдосконалення організаційних заходів для забезпечення надійності електродвигунів технологічних процесів сільськогосподарського виробництва є актуальним.

Метою дослідження є розробка рекомендацій щодо забезпечення надійності електродвигунів технологічних процесів сільськогосподарського виробництва організаційними заходами, зокрема, щодо врахування показників надійності електродвигунів в обґрунтуванні раціональної організації їхньої технічної експлуатації.

Основні матеріали досліджень. Врахування вимог нормативних документів – це основа надійної експлуатації будь якого електрообладнання, зокрема, електродвигунів.

Наприклад, згідно з ПУЕ п.п. 5.3.18-5.3.22 «Електродвигуни, які встановлюють у приміщеннях з нормальним середовищем, як правило, повинні мати виконання IP00 або IP20... Електродвигуни, які встановлюють у місцях з хімічно активними парою або газами, повинні мати виконання, не гірше ніж IP44…» [1].

При цьому, на сьогодні вже не має чинності стандарт ГОСТ 14254-96 «Ступені захисту, що забезпечуються оболонками», а на заміну введені стандарти, які гармонізовані з європейськими стандартами, зокрема, ДСТУ IEC 60529:2019 та ДСТУ EN 60034-5:2022, однак, текст цих стандартів на спеціалізованих сайтах на момент дослідження відсутній.

Така саме ситуація зі стандартом ГОСТ 15150-69 «Машини, прилади і інші технічні вироби. Виконання для різних кліматичних районів. Категорії, умови експлуатації, зберігання і транспортування в частині дії кліматичних чинників зовнішнього середовища. Зі Змінами 1-III-78, 2-IV-83, 3-II-89, 4-ІПС8-2002», який втратив чинність.

На сьогодні чинний ДСТУ IEC 60654-1-2001 [3], що доступний для ознайомлення, наводить умовні позначення категорії розміщення та кліматичні категорії з параметрами навколишнього середовища за європейським стандартом IEC 60721-3 старої редакції, якій за новою редакцією вже також прийнятий в Україні як державний стандарт [4] англійською мовою, але на момент дослідження на спеціалізованих сайтах текст цього стандарту також не надійшов.

При цьому у стандарті [3] категорії розміщення позначаються не цифрами, а літерами (A, B, C, D) та враховується велика кількість складових навколишнього середовища (температура повітря, швидкість її змінення, абсолютна та відносна вологість, сонячного випромінювання, конденсація, опади, обледеніння). Таким чином, аналіз вказаного нормативного забезпечення показав, що знаходження відповідно інформації поки ще викликає певні труднощі. Організаційним заходом забезпечення експлуатаційної надійності електродвигунів є і раціональна організація служби технічної експлуатації. Аналіз алгоритму розрахунків під час організації служби технічної експлуатації електродвигунів, показав, що розрахунок трудомісткості можливих робіт з усунення відмов електродвигунів закладається на рівні 30 % від трудомісткості технічного обслуговування та ремонту, що може бути занадто великим значенням внаслідок використання, наприклад, електродвигунів з підвищеним сервіс-фактором. Також, ця трудомісткість може значно відрізнятися від

вказаного відсотку при використанні електродвигунів з певними технічними характеристиками щодо його надійності, що заявлені заводом-виготовлювачем або які є в умовах експлуатації.

Був проаналізований приклад врахування показників надійності електродвигунів для визначення можливої трудомісткості усунення відмов та розрахунків кількості витратних матеріалів та запасних частин для якісних ремонтних робіт.

Зокрема, за технічною документацією відомо, що асинхронні електродвигуни серій 4А та АМ мають такі показники надійності: середній термін служби – не менше 15 років при напрацюванні 4000 год; середній термін служби до першого капітального ремонту – 8 років при напрацюванні 20 000 год; ймовірність безвідмовної роботи – щонайменше 0,9 за 10000 год [5].

Відповідно, наприклад, якщо в експлуатації знаходяться 100 електродвигунів серії 4А, то згідно з показниками надійності, що приведені вище, через 10000 год. наробітку відмовлять 10 електродвигунів. Тобто інтенсивність відмов 0,00001. При цьому, якщо електродвигуни працюють 8 годин на добу, то за рік це напрацювання не 10000 годин, а 2920 годин. При роботі 24 години на добу – це 8760 годин. Звідси, приймаючи експоненціальний закон розподілу відмов, визначаємо ймовірність безвідмовної роботи цих двох випадків P(2920)=0,97, P(8760)=0,92. Таким чином, зі 100 електродвигунів за рік експлуатації ймовірно, що відмовлять 3 за умови, що вони працюють 8 годин на добу. Тобто річну трудомісткість оперативного обслуговування можна прийняти біля 3% від трудомісткості технічного обслуговування та ремонту усіх електродвигунів, що знаходяться в експлуатації (за таким спрощеним підходом). У випадку, коли двигуни працюють 24 години на добу, то за рік експлуатації відмовлять 8 електродвигунів зі 100, тобто річну трудомісткість оперативного обслуговування можна прийняти біля 8% від трудомісткості технічного обслуговування та ремонту усіх електродвигунів, що знаходяться в експлуатації. Однак, якщо більш точно підходити до визначення цього параметру, то також необхідно враховувати час на діагностування несправності та випробування. Наприклад, за стандартом СОУ-Н ЕЕ 05.837:2006 [6], трудомісткість поточного ремонту з випробуваннями електродвигунів складає 3 години.

Висновок. Запропоновані рекомендацій щодо забезпечення надійності електродвигунів технологічних процесів сільськогосподарського виробництва можуть бути корисними під час організації роботи служби технічної експлуатації електродвигунів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок. – Київ : Міненерговугілля України. 2017. – 617 с.

2. Організація технічного сервісу електрообладнання АПК: метод. вказівки до виконання практичних робіт з дисц. «Технічний сервіс електрообладнання АПК» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочн. форм навч., спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Державний біотехнологічний університет; упоряд.: І. М. Трунова. – Харків : [б. в.], 2022. – 36 с.

3. Обладнання для вимірювання та керування в промислових процесах. Умови експлуатації. Частина 1. Кліматичні умови (IEC 60654-1:1993, IDT): ДСТУ IEC 60654-1-2001. [Чинний з 2003-07-01] – К.: Держспоживстандарт, 2003. – 24 с.

4. Класифікація умов навколишнього середовища. Частина 3-3. Класифікація груп параметрів навколишнього середовища та їх суворості. Стаціонарне використання в місцях, захищених від погодних умов (EN IEC 60721-3-3:2019, IDT; IEC 60721-3-3:2019, IDT): ДСТУ IEC 60721-3-3:2022. [Чинний з 2023-12-31] – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 28 с.

5. Офіційний сайт НВП «ТМ». URL: http://npptm.com.ua/electric-4a-4am.html (дата звернення: 1.11.2024).

6. Норми часу на ремонт і технічне обслуговування електричних мереж. Роботи служби ізоляції. Том 8: СОУ-Н ЕЕ 05.837:2006. – ДП «Львівське конструкторське бюро», 2006. – 122 с.

УДК 621.311

ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ ШЛЯХОМ МАНЕВРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Шрам О. А., к.т.н., доц., e-mail: alexshrum@yahoo.com
Братковська К. О., к.е.н., доц., e-mail: bratkovskaja@gmail.com
Національний університет «Запорізька політехніка»

Актуальність дослідження. Встановлена потужність відновлюваних джерел енергії стрімко зростає в енергетичних системах всіх країн світу. Це обумовлено глобальною тенденцією декарбонізації енергетичного сектору та збільшити частку так званої «зеленої» енергії і підвищити енергетичну безпеку країни. В той же час обсяги генерації відновлюваних джерел суттєво залежать від погодних умов і мають, відповідно, випадковий характер. Це обумовлює періодичні обмеження в обсягах генерації сонячних та вітрових електростанцій з боку енергосистеми при різкому зменшенні навантаження в ній.

Таким чином зростання обсягів генерації ВДЕ, невідповідність заявленого споживання електроенергії фактичному, певна його стохастичність призводять до суттєвих розбіжностей між погодинними заявленими обсягами продажу та купівлі електроенергії на ринку на добу наперед (РДН) (рис. 1). Це в свою чергу призводить до необхідності врегулювання зазначених невідповідностей (небалансів) на внутрішньодобовому (ВДР) та балансуючому ринках, що вимагає додаткових фінансових витрат.

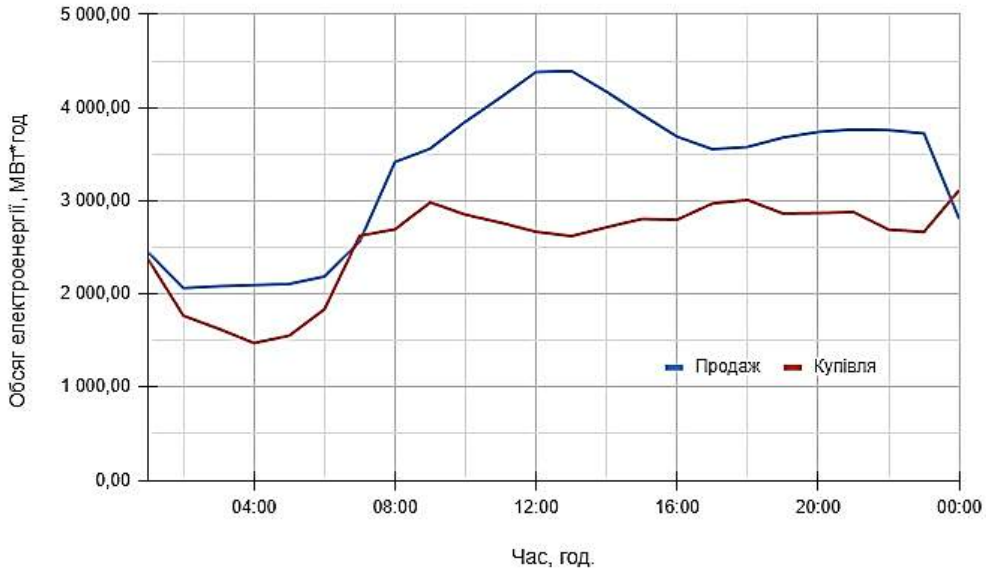


Рисунок 1 – Погодинні заявлені обсяги продажу та купівлі електроенергії на РДН

Одним з таких ефективних заходів щодо мінімізації витрат на електричну енергію є управління піковим навантаженням. Зазвичай при цьому пропонується обмежувати споживання електричної енергії вдень, коли вона використовується найбільше і, відповідно, коштує найдорожче та переносити робочі процеси на нічний час. Але при цьому недостатньо уваги приділяється можливостям маневрування навантаженням споживачів промислових підприємств задля такої оптимізації.

Мета дослідження — оцінка економічної доцільності маневрування навантаженням промислових підприємств для зменшення витрат на оплату за спожиту електричну енергію.

Основні матеріали досліджень. У роботі [1] зазначається, що на промислових підприємствах є багато споживачів електричної енергії, які мають можливість обмежувати тривалість своєї роботи чи переносити її на інші години впродовж доби. Такі споживачі

можуть збільшувати власне споживання електроенергії у години мінімального навантаження та зменшувати його у пікові години без суттєвого впливу на технологічний процес. Таким чином, використовуючи споживачі-регулятори для маневрування навантаженням підприємство може не тільки покращити форму добового графіка, але й зменшити небаланси електроенергії, які викликані зазначеними вище причинами. В результаті можна суттєво зменшити витрати за спожиту підприємством електричну енергію. Можливості підприємства щодо маневрування навантаженням залежать від багатьох факторів, а саме: від характеру технологічних процесів, потужності та кількості споживачів-регуляторів тощо. Для визначення потенційної можливості підприємства, чи його окремого підрозділу, маневрувати навантаженням задля зменшення коливань потужності, покращення форми добового графіка навантаження та зменшення небалансів електричної енергії доцільно визначити коефіцієнт його маневрових можливостей k_M.

$$k_M = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}\left(T_{\Pi i} / 1440\right)}{m},$$

де $T_{\Pi i}$ – тривалість паузи робочого циклу i-го споживача електроенергії, хв;
m – наявна кількість споживачів електроенергії.

Цей коефіцієнт враховує кількість хвилин, на яку можна зупинити або перенести роботу споживача-регулятора без порушення технологічного процесу. Можливість і економічна доцільність використання таких споживачів-регуляторів була розглянута на одному з промислових підприємств м. Запоріжжя. Через неспівпадіння прогнозованого споживання електроенергії з фактичним виникали додаткові витрати, пов'язані із необхідністю оплачувати погодинні небаланси. В результаті проведених розрахунків було встановлено, що добова вартість небалансів становить 17 329,61 грн, що відповідає 8,67% від вартості добового споживання електроенергії, яка складає 199 792,51 грн. В результаті погодинного аналізу фактичного та прогнозованого споживання електроенергії були визначені періоди його неспівпадіння та задіяні відповідні споживачі-регулятори для зменшення небалансів. В результаті реалізації запропонованого підходу добова вартість небалансів склала 12 288,70 грн, що відповідає 6,27% від вартості добового споживання електроенергії. Отже, в результаті залучення споживачів-регуляторів до маневрування електричним навантаженням підприємства вартість небалансів зменшилася на 29%, що призвело до зменшення вартості добового споживання електроенергії на 1,94%.

Висновок. Певні споживачі електроенергії промислових підприємств мають можливість обмежувати тривалість своєї роботи або переносити її на інші години протягом доби. Залучення таких споживачів до маневрування навантаженням дозволяє не тільки вирівняти добовий графік, а й зменшити погодинні небаланси електроенергії та скоротити витрати на неї. Для розглянутого підприємства використання таких споживачів-регуляторів дозволило зменшити вартість небалансів на 29%, а добову вартість споживання електроенергії на 1,94%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Качан Ю. Г., Шрам О. А. Оцінка маневрових можливостей електронавантажень промислових підприємств. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2022. Вип. 2 (58). С. 17–23. DOI: 10.30929/2072-2052.2022.2.58.17-23.

УДК 621.3

ФАКТОРИ ЯКІСНОГО МОНТАЖУ ЕЛЕКТРОЩИТОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Юрченко О. Ю., PhD, доц., e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com
Сумський національний аграрний університет

Актуальність дослідження. Виконання робіт у щитах керування електроустаткуванням полягає в реалізації різних схем. Такі схеми спрямовано на задоволення потреб споживача. Одночасно із цим, доцільно підкреслити, що якість виконання таких робіт згодом впливає на рівень комфорту різних людей. Скажімо, стосується це і користувача електроустаткуванням, і персоналу, задіяного в подальшому ремонті або його обслуговуванні.

Мета дослідження. Матеріали даної публікації спрямовано на теоретичне та практичне обґрунтування доцільності впровадження сучасних технічних рішень по виконанню монтажних робіт в електричних щитах. Ефективність їх функціонування має наслідок, перш за все, в безпеці для людини. Після безпеки необхідно підкреслити комфорт та якість функціонування обладнання вцілому.

Основні матеріали досліджень. Виконання робіт в щитах керування електроустаткуванням, як, наприклад, електричними двигунами, так і проводкою певного приміщення, полягає в наборі кількох основоположних особливостей. Такими особливостями є:

- провідники електричного струму;
- пристрої захисту;
- елементи керування;
- інструмент;
- підходи до виконання робіт.

Окремо необхідно підкреслити, що якісна підготовка до виконання монтажних робіт є базовим завданням, від виконання якого залежить подальший процес монтажу, а також функціонування змонтованого щита.

Вимоги до виконання монтажних робіт значною мірою реалізовано в Правилах улаштування електроустановок та Правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Зокрема, якщо коротко представити окремі приклади вимог щодо виконання проводки та підключення провідників електричного струму, то необхідно підкреслити наступні. Пп. 2.1.12 «Для виконання стаціонарної електропроводки дозволено використовувати гнучкі кабелі і проводи. Стаціонарне обладнання, яке може переміщуватися під час монтажу і обслуговування, треба підключати гнучкими кабелями або шнурами. Пересувне обладнання потрібно підключати лише гнучкими кабелями і шнурами з подвійною ізоляцією (за винятком обладнання, яке живиться через тролеї або контактні рейки)». Або ж пп. 5.3.32 ПУЕ зобов'язує кабелі і проводи, які приєднують до електродвигунів, установлених на віброізолювальних основах, на ділянці між рухомою і нерухомою частинами основи мати гнучкі мідні жили. Конкретна класифікація провідників та відповідні їм характеристики визначають середовище, де їх дозволено встановлювати.

Серед пристроїв захисту на сьогодні є велика кількість устаткування, що працює як на захист від коротких замикань та перевантажень, зокрема автоматичні вимикачі, так і на диференційний захист (пристрої захисного відключення, диференційні автоматичні вимикачі), пристрої захисту від дугових перевантажень тощо. Порівняно, значної уваги потребують пристрої диференційного захисту. Згадані вище пристрої захисного відключення та диференційні автоматичні вимикачі, працюють за принципом рівності суми струмів на вході та на виході. Тобто, основним завданням таких пристроїв є виявлення та реакція на витоки струму на землю, головним виконуючим елементом чого є вбудований в їх конструкцію диференційний трансформатор струму. Серед елементів керування на сьогодні зустрічаються як кнопкові пости, так і комбіновані елементи, – засоби керування з

пристроями сигнальної арматури, різного роду реле, контактори тощо. Використання таких пристроїв дає можливість, за потреби, функціонування окремих елементів електрощитового обладнання в автоматизованому режимі.

Чи не одним з найголовніших на сьогодні питань залишається відкрите дискусійне питання виконання монтажних робіт тим чи іншим інструментом. Переважна більшість сучасних електромонтерів сьогодні хоча би частково, але перейшли на порівняно новий рівень інструменту. Класичний шарнірно-губцевий інструмент сьогодні уже зустрічається порівняно рідше. НА заміну йому наявними є:

- кабелерізи;
- знімачі ізоляції;
- прес-кліщі.

Окремої уваги заслуговує електроінструмент. В такому випадку, порівняно більше зустрічається акумуляторний електроінструмент. Тобто електроінструмент, класифікований з гідно з пп. 6.7.1 ПБЕ як електроінструмент ІІІ класу за умовами безпеки. Такий електроінструмент призначений для живлення від безпечної наднизької напруги. Серед представників інструменту наявними є:

- акумуляторні викрутки;
- шуруповерти;
- гайковерти;
- акумуляторні болгарки;
- акумуляторні перфоратори.

Перевагою використання такого електроінструменту є його автономність та безпека виконуваних робіт з точки зору ураження людини електричним струмом.

Окремі підходи в виконанні монтажних робі стосуються використання різного технологічного устаткування. Зокрема, доцільним та ефективним є використання гребінчастих шин, за рахунок чого одночасно реалізується покращений вигляд змонтованого щита, а також економія провідникових матеріалів. З’єднання провідників електричного струму на сьогодні з урахуванням перерахованого вище інструменту також значним чином може забезпечити економію провідникових матеріалів, а також естетичність щита керування. Зокрема, згідно з пп. 2.1.53 ПУЕ, з’єднання, відгалуження та окінцювання жил проводів і кабелів треба виконувати за допомогою опресовування, зварювання, паяння або стискних пристроїв (гвинтових, болтових тощо) з урахуванням вимог чинних інструкцій, затверджених в установленому порядку. Використання прес-кліщів значною мірою покращує рівень виконання монтажних робіт, зокрема з’єднання провідників, їх встановлення тощо.

Висновок. Представлені окремі положення щодо кроків до якісного електромонтажу є лише частиною сучасних технологій та тенденцій в розвитку електроенергетики. Доцільно підкреслити, що основною метою усіх перерахованих заходів є безпека виконання монтажних робіт, безпека подальшого користування електрообладнанням та відповідний рівень комфорту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В., Чепіжний А. В., Тимошенко Г. А. // Монтаж електрообладнання і систем керування. Монтаж щитів керування електричними двигунами // Навчально-методичний посібник для здобувачів освіти 2, 1 с.т. курсів спеціальності: «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» інженерно-технологічного факультету денної та заочної форми навчання, СВО «бакалавр». – Суми: СНАУ, 2023. – 144 с.

2. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2017. – 760 с.

3. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К.: Основа, 2007. – 384 с.

УДК 663.004.183; 631.172

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ НЕСИМЕТРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У СІЛЬСЬКИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ І ТЕХНІЧНІ ПІДХОДИ ДО ЇЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Ялама А. І., магістр, e-mail: yalama916@gmail.com
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Дудніков С. М., доц., e-mail: dydnikov@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Несиметрія електричних параметрів у сільських розподільчих мережах є однією з найпоширеніших технічних проблем, що негативно впливає на якість електроенергії, надійність роботи обладнання та ефективність енергопостачання. Основними причинами виникнення несиметрії є нерівномірний розподіл однофазних навантажень по фазах, значна протяжність ліній 0,4–10 кВ, неоднорідність провідників і несиметричні умови заземлення. Через ці фактори виникають відхилення фазних напруг і струмів, що призводить до появи додаткових втрат потужності, нагрівання трансформаторів і електродвигунів, зниження їх ККД і скорочення строку служби.

Особливо гостро проблема проявляється в сільських мережах, де споживачі розосереджені, а характер навантаження має сезонний або циклічний характер. Несиметрія спричиняє додаткові реактивні потоки енергії та впливає на стабільність напруги у віддалених точках мережі. Для її мінімізації доцільним є впровадження систем моніторингу фазних параметрів, автоматичного перерозподілу навантаження між фазами, використання симетруючих трансформаторів і пристроїв компенсації. Ефективне вирішення цієї проблеми є запорукою стабільного електропостачання та підвищення енергоефективності сільських мереж.

Мета дослідження – дослідження рівнів та аналіз технічних і організаційних заходів зниження несиметрії в сільських мережах 0,38/0,22 кВ.

Основні матеріали досліджень. Сільські електричні мережі напругою 0,38/0,22 кВ є найнижчим рівнем системи розподілу електроенергії, де безпосередньо здійснюється живлення побутових, фермерських і виробничих споживачів. Саме на цьому рівні найчастіше виникають проблеми несиметрії електричних параметрів, що пояснюється нерівномірним навантаженням по фазах, великою протяжністю ліній, а також сезонним характером електроспоживання. Дослідження показують, що коефіцієнт несиметрії напруги в таких мережах часто перевищує 2–3 %, а іноді сягає 5 %, що перевищує допустимі норми, встановлені стандартом ДСТУ EN 50160:2014.

Експериментальні дослідження, проведені в типовій сільській мережі 0,38/0,22 кВ Харківської області, засвідчили, що рівень несиметрії напруги залежить від кількості однофазних навантажень і їхнього добового графіка. У години вечірнього максимуму напруга в одній фазі може знижуватися на 8–10 %, тоді як в іншій – підвищуватися на 3–5 %. Такий дисбаланс спричиняє коливання освітлення, збої в роботі електронних пристроїв і перегрів електродвигунів трифазних механізмів.

Для оцінювання рівня несиметрії застосовують коефіцієнти напруги зворотної й нульової послідовностей. Згідно з методиками IEC 61000-4-30, допустиме значення несиметрії напруги не повинно перевищувати 2 % у нормальному режимі експлуатації. Проте у сільських мережах ці показники часто перевищують норму в 1,5–2 рази через складність балансування навантаження та обмежені технічні ресурси операторів мереж.

Зниження рівня несиметрії можливе завдяки впровадженню комплексу технічних і організаційних заходів. До технічних належать:

1. Оптимальний перерозподіл навантаження між фазами. Здійснюється шляхом вимірювання фазних струмів і перенесення частини однофазних споживачів з перевантаженої фази на менш навантажену. Автоматизовані системи моніторингу (АСКОЕ) дозволяють виконувати цей процес дистанційно.

2. Використання симетруючих трансформаторів та пристроїв. Наприклад, трансформатори типу «трикутник-зірка» або симетруючі пристрої на базі дроселів і конденсаторів дозволяють зменшити різницю між фазними напругами до допустимих меж.

3. Установлення регулюючих пристроїв напруги. Використання стабілізаторів або автоматичних регуляторів напруги (АРН) забезпечує підтримання напруги в межах ±5 % навіть при нерівномірному навантаженні.

4. Заміна старих повітряних ліній на ізольовані самонесучі проводи (СІП). Це зменшує контактні втрати, забезпечує кращу симетрію опорів по фазах і підвищує надійність мережі.

5. Реконструкція трансформаторних підстанцій. Встановлення сучасних трансформаторів із роздільним регулюванням фаз дозволяє компенсувати перекоси напруги в реальному часі.

Організаційні заходи передбачають:

- проведення планових енергетичних аудитів сільських мереж з метою виявлення фазних перекосів;
- інформування споживачів щодо необхідності рівномірного розподілу навантажень (наприклад, перенесення частини побутових приладів на іншу фазу);
- створення системи обліку і моніторингу напруги з використанням PLC-технологій, які дозволяють контролювати параметри безпосередньо по лініях електропередачі;
- модернізацію систем захисту і автоматики, що реагують на критичні значення несиметрії та здійснюють автоматичне відключення або балансування навантажень.

Комплексне впровадження таких заходів дозволяє зменшити рівень несиметрії напруги до нормативних значень 1,5–2 %, знизити втрати електроенергії на 3–4 % та підвищити ресурс роботи електрообладнання на 10–15 %. Крім того, покращується якість електропостачання, що особливо важливо для сільськогосподарських підприємств із безперервними технологічними процесами (молочні ферми, тепличні комплекси, елеватори).

Отже, проведений аналіз доводить, що несиметрія в мережах 0,38/0,22 кВ є комплексною технічною проблемою, вирішення якої потребує системного підходу. Поєднання технічних засобів балансування навантажень з організаційними заходами моніторингу та обліку дає змогу суттєво підви щити ефективність і надійність сільських електричних мереж.

Висновок. Проведені дослідження підтверджують, що несиметрія електричних параметрів у сільських мережах 0,38/0,22 кВ залишається однією з ключових причин погіршення якості електроенергії та зниження енергоефективності систем розподілу. Основним чинником є нерівномірний розподіл однофазних навантажень і застарілий стан мережевого обладнання. Застосування технічних засобів балансування, симетруючих пристроїв і систем моніторингу АСКОЕ, у поєднанні з організаційними заходами, дає змогу суттєво знизити рівень несиметрії до нормативних меж. Це сприяє підвищенню надійності електропостачання, зменшенню втрат енергії та продовженню терміну служби електрообладнання у сільських енергетичних системах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дудніков С. М. Тактика поведінки персоналу електричних мереж в умовах утворення ожеледі на ПЛ [Текст] / С. М. Дудніков, О. А. Савченко // Праці Таврійського держ. агротехнол. ун-ту. – Мелітополь, 2013. – Вип. 13, Т. 5. – С. 58–61.

2. Засуха О. М. Доцільність упровадження АСКОЕ в сільських мережах [Текст] / О. М. Засуха ; наук. керівник С. М. Дудніков // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді : матеріали III Всеукр. наук.-практ. конф., Держ. біотехнол. ун-т, 3 квіт. 2025 р. – Харків: ДБТУ, 2025. – С. 12.

3. Dydnikov S. Methodological aspects of evaluating the effectiveness of using local energy systems with renewable sources [Electronic resource] / S. Dydnikov, O. O. Miroshnyk, S. J. Kovalyshyn, V. V. Ptashnyk, K. Mudryk // Renewable Energy Sources : 6th International Conference, Krynica, 12-14 June 2019. – Krynica, 2020. – Vol. 154. – DOI: 10.1051/e3sconf/202015407013.

СЕКЦІЯ 2. ВІДНОВЛЮВАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.383.51

НАПІВПРОЗОРІ СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ: ТЕХНОЛОГІЇ, ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Братчиков О. С., викл., e-mail: xahter3@gmail.com
Шевченко К. Ю., викл., e-mail: karina.shevcenko1988@gmail.com
ВСП «Харківський фаховий коледж харчової промисловості ДБТУ»

Актуальність дослідження. Уявіть собі світ, де кожне вікно у вашому будинку, кожен скляний фасад хмарочоса або навіть дах теплиці не просто захищає від негоди, а й тихо генерує чисту енергію. Це не наукова фантастика, а реальність, що стає можливою завдяки напівпрозорим сонячним панелям (НСП). У той час як людство гостро потребує нових джерел енергії, ця технологія пропонує елегантне рішення: перетворити пасивні поверхні, що нас оточують, на активні генератори електрики.

Основні матеріали досліджень та технології напівпрозорих сонячних елементів. На сьогодні існує кілька основних технологій для створення напівпрозорих фотоелектричних пристроїв, кожна з яких має свої переваги та недоліки.

Тонкоплівкові сонячні елементи (Thin-Film Solar Cells). Технології на основі аморфного кремнію (a-Si), телуриду кадмію (CdTe) та диселеніду міді-індію-галію (CIGS) можуть бути адаптовані для створення напівпрозорих панелей. Прозорість досягається шляхом зменшення товщини фотоактивного шару до декількох нанометрів, що дозволяє частині фотонів проходити крізь нього. Хоча цей метод є відносно дешевим у виробництві, він часто пов'язаний з компромісом між ефективністю та рівнем прозорості: чим вища прозорість, тим нижча ефективність перетворення енергії.

Органічні сонячні елементи (Organic Photovoltaics, OPV). Ця технологія використовує органічні полімери або малі молекули як фотоактивний шар. Ключовою перевагою OPV є можливість налаштування спектра поглинання, що дозволяє створювати елементи, які поглинають світло переважно в ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазонах, залишаючись прозорими у видимому спектрі. Це робить їх ідеальними для інтеграції у вікна. Органічні сонячні елементи є гнучкими, легкими та можуть виготовлятися у різних кольорах, однак їхня ефективність та довговічність поки що поступаються неорганічним аналогам.

Перовськітні сонячні елементи (Perovskite Solar Cells, PSC). Перовськіти є класом матеріалів з унікальною кристалічною структурою, які демонструють стрімке зростання ефективності. Напівпрозорі PSC створюються шляхом оптимізації товщини шару перовськіту та використання прозорих електродів. Дослідження показують, що тандемні структури, де перовськітний елемент поєднується з кремнієвим, можуть досягати надзвичайно високої ефективності. Головними викликами для цієї технології залишаються стабільність матеріалу в умовах вологості та високих температур, а також токсичність свинцю, що входить до складу багатьох перовськітів.

Прозорі люмінесцентні сонячні концентратори (Transparent Luminescent Solar Concentrators, TLSC). Ця інноваційна технологія використовує органічні солі, які поглинають невидиме ультрафіолетове та інфрачервоне світло і перевипромінюють його на інших довжинах хвиль. Це світло потім направляється до країв скляної панелі, де розташовані невеликі, непрозорі фотоелектричні елементи (рис. 1). Таким чином, основна поверхня скла залишається повністю прозорою для видимого світла. Дослідники з Мічиганського державного університету досягли ефективності близько 1% при збереженні високого рівня прозорості, що є перспективним для застосувань, де естетика є пріоритетом.

Метою дослідження є аналіз сучасних технологій виробництва напівпрозорих сонячних панелей (НСП), їх ключових характеристик, сфер застосування та перспектив подальшого вдосконалення та найперспективнішого напряму інноваційних фотоелектричних технологій, що здатні генерувати електроенергію, пропускаючи при цьому видиме світло.

Напівпрозорі сонячні панелі (НСП) відкривають широкі можливості для інтеграції в міське середовище та інші галузі, перетворюючи пасивні поверхні на активні елементи генерації енергії. Так, основними сферами застосування НСП є:

Будівлі з нульовим споживанням енергії (BIPV – Building-Integrated Photovoltaics). Вікна, скляні фасади та дахи можуть генерувати електроенергію, одночасно виконуючи свої основні функції. Це зменшує навантаження на централізовані електромережі та знижує експлуатаційні витрати на будівлю.

Агровольтаїка (Agrivoltaics). Напівпрозорі панелі можуть використовуватися для накриття теплиць. Вони забезпечують рослини необхідним для фотосинтезу світлом, одночасно генеруючи енергію для живлення систем поливу, опалення та освітлення. Дослідження показують, що затінення від панелей може також захищати рослини від надмірного сонячного випромінювання та зменшувати потребу у воді.

Транспорт. Інтеграція НСП у люки та вікна електромобілів може забезпечити додаткову енергію для бортових систем або незначно збільшити запас ходу.

Портативна електроніка. Екрани смартфонів та інших гаджетів можуть бути оснащені прозорим фотоелектричним шаром для підзарядки акумулятора від навколишнього світла.

Незважаючи на значний прогрес, перед масовим впровадженням НСП стоїть низка викликів. Основним є досягнення балансу між такими ключовими параметрами: ефективністю перетворення енергії (PCE), середньою прозорістю у видимому діапазоні (AVT) та довговічністю.

Що до вартості, то виробництво деяких типів НСП, особливо з використанням рідкісних матеріалів, залишається дорогим і уповільнює їх комерціалізацію.

У майбутньому дослідження маютьбудути зосереджені на розробці нових, більш стабільних та нетоксичних матеріалів, оптимізації архітектури пристроїв (наприклад, створення багатошарових тандемних структур) та масштабуванні виробничих процесів для зниження вартості.

Висновок. Напівпрозорі сонячні панелі є революційною технологією з величезним потенціалом для інтеграції відновлюваної енергетики в повсякденне життя. Технології на основі органічних полімерів, перовськітів та люмінесцентних концентраторів відкривають нові горизонти для застосування у будівництві, сільському господарстві та транспорті. Хоча існують виклики, пов'язані з ефективністю, довговічністю та вартістю, інтенсивні наукові дослідження та інновації дозволяють прогнозувати, що найближчим часом НСП стануть невід'ємною частиною сталого енергетичного майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Reese M. O., Gessert T. A., Dhere R. G. et al. Opportunities for Back-Contact-Only Transparent Conducting Oxides in CdTe Solar Cells. IEEE Journal of Photovoltaics. 2014. Vol. 4, Is. 6. P. 1658–1662. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2359449.

2. Chen C., Jia X., Xu Y. et al. Recent progress in semitransparent organic photovoltaics. Science and Technology of Advanced Materials. 2021. Vol. 22, Is. 1. P. 203–221. DOI: 10.1080/14686996.2021.1896328.

3. Heo J. H., Lee M. H., Song M. H. et al. Highly efficient and stable semi-transparent perovskite solar cells for solar windows. Journal of Materials Chemistry A. 2016. Vol. 4, Is. 30. P. 11614–11620. DOI: 10.1039/C6TA05020J.

УДК 004.942

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИРОБІТКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

Волобуєв А. С., асп., e-mail: andreyvolobuev7777@gmail.com
Савченко О. А., к.т.н., доц., e-mail: savoa@btu.kharkiv.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Стрімке зростання потреби в енергії та недоліки використання викопного палива для виробництва електроенергії призвели до посилення уваги до відновлювальних джерел енергії. Внаслідок цього дослідження щодо застосування альтернативних ресурсів набули особливого значення. На виробництво енергії електростанціями, які генерують електрику з відновлювальних джерел, впливає безліч чинників. Електростанції, що використовують сонячну енергію як одне з відновлювальних джерел, суттєво залежать від екологічних факторів та метеорологічних змінних, що позначається на безперервності виробництва електроенергії на сонячних електростанціях (СЕС). З огляду на це, у даному дослідженні розроблено прогнозні моделі на основі двох різних методів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу та передбачення змін у виробництві електроенергії СЕС через вплив екологічних факторів та метеорологічних коливань.

Мета дослідження – оцінювання ефективності застосування алгоритмів на основі штучних мереж довгої короткострокової пам'яті та випадкового лісу для прогнозування виробітку електричної енергії сонячними електростанціями.

Основні матеріали досліджень. Регресійний аналіз методом випадкового лісу (RF) є методом машинного навчання, запропонованим Брейманом [1]. Регресія випадковим лісом – це алгоритм, який спрямований на створення точніших і надійніших прогнозів через використання множинних дерев рішень. Кожне дерево рішень навчається на випадковій підвибірці з набору даних, а результати цих дерев об'єднуються. Цей процес підвищує здатність моделі до узагальнення та зменшує проблему перенавчання. Завдяки цим перевагам метод використовувався в процесах прогнозування для різноманітних застосувань.

Встановлення сонячних електростанцій на дахах та на відкритих територіях є досить поширеним. Оцінки фотоелектричного потенціалу мають велике значення для техніко-економічного обґрунтування цих електростанцій. Численні дослідження вивчали потенціал сонячної енергії в малих і великомасштабних дахових сонячних електростанціях [2–6]. Принцип роботи регресії RF полягає в тому, що спочатку з наявного навчального набору даних створюються N бутстреп-вибірок. Бутстреп-вибірка – це випадково відібрані підмножини даних (які можуть бути обрані рекурсивно) із загального набору даних. Цей процес формує різні навчальні набори даних для кожного дерева рішень.

У цьому дослідженні регресійний аналіз методом випадкового лісу (RF) застосовано для оцінки виробництва електричної енергії СЕС з урахуванням екологічних факторів та забруднення. У регресії RF навчальний набір даних включає погодинну тривалість сонячного сяяння, накопичене опромінення (Вт·год/м²), погодинні максимальну та мінімальну температури, вологість (%), погодинну температуру, погодинну загальну кількість опадів (кг/м²), швидкість вітру (м/с) та дані про забруднення. На основі цих даних виробництво електричної енергії СЕС прогнозуватиметься за допомогою регресії RF. Усі ці дані складаються загалом із 109 824 окремих записів.

Код регресійного аналізу написано в середовищі MATLAB. Незалежні змінні нормалізуються під час визначення рівняння моделі. Для цього використано нормалізацію за Z-оцінкою (стандартизацію).

Штучні нейронні мережі LSTM також мають значний потенціал у прогнозуванні виробництва сонячних електростанцій. Завдяки своїй здатності обробляти такі складні та

часово залежні дані, мережі LSTM можуть використовуватися як ефективний інструмент для прогнозування виробництва сонячних електростанцій.

Дані, використані в дослідженні, є реальними показниками, зібраними з діючої сонячної електростанції потужністю 180 кВт. Збір даних розпочався з дня введення станції в експлуатацію. На основі фактичних даних продемонстровано вплив забруднення та екологічних факторів на виробництво енергії фотоелектричними панелями. Для мінімізації цих впливів та вивчення того, як несприятливі умови позначаються на ефективності виробництва, застосовано два різні аналітичні методи: модель регресії випадкового лісу (RFR) та штучні нейронні мережі (ШНМ). Використовувалися мережі довгої короткострокової пам'яті (LSTM) – різновид штучних нейронних мереж.

За допомогою регресійного аналізу методом випадкового лісу (RF), який аналізує виробництво енергії на основі нелінійних незалежних вхідних змінних, створено прогнозну модель зниження енергопродукції електростанції через забруднення та екологічний вплив. Модель оцінювала виробництво електроенергії СЕС на підставі вимірювань екологічного впливу та забруднення.

На іншому етапі аналізу нейронні мережі навчалися на даних СЕС та вимірювальної станції з використанням мереж LSTM. Виробництво енергії електростанції прогнозувалося за допомогою навчених нейромереж LSTM. Навчальний набір даних містить погодинну тривалість сонячного сяяння, накопичене опромінення (Вт·год/м²), погодинні максимальну та мінімальну температури, вологість (%), погодинну температуру, погодинну загальну кількість опадів (кг/м²), а також щоденні та погодинні дані з моменту запуску електростанції. Він складається з даних про швидкість вітру (м/с), забруднення та показники виробництва енергії станції. Загалом у прогнозній моделі оброблено 119 808 точок даних, що підкреслює деталізованість аналізу.

Результати оцінювалися за чотирма різними показниками продуктивності: коефіцієнт кореляції (R), відносна валова похибка (FGE), середня стандартна похибка (MSE) та середньоквадратична похибка (RMSE). Результати RF показали коефіцієнт кореляції 0,8111 з прогнозами. Натомість прогнози мережі LSTM мали значення R 0,9759. Порівнюючи RF та LSTM, очевидно, що LSTM забезпечує значно кращі результати в моделях, створених на повному наборі даних.

Висновок. Проведено порівняння точності прогнозування виробництва електричної енергії сонячними електростанціями за допомогою алгоритмів на основі штучних мереж довгої короткострокової пам'яті та випадкового лісу. Розрахунки показують, що перший з алгоритмів дає суттєво більшу точність прогнозування – коефіцієнт кореляції з фактичними значеннями сягає 0,98.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Breiman L. «Random forests», Mach. Learn., vol. 45, pp. 5–32, Oct. 2001.

2. Ordóñez J., Jadraque E., Alegre J., and Martínez G. «Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain)», Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 7, pp. 2122–2130, Sep. 2010.

3. Patankar P. P., Munshi M. M., Deshmukh R. R., and Ballal M. S. «A modified control method for grid connected multiple rooftop solar power plants», IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 57, no. 4, pp. 3306–3316, Jul./Aug. 2021.

4. Rodríguez L. R., Duminil E., Ramos J. S., and Eicker U. «Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach», Sol. Energy, vol. 146, pp. 264–275, Apr. 2017.

5. Adinoyi M. J., and Said S. A. M. “Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules,” Renew. Energy, vol. 60, pp. 633–636, Dec. 2013.

6. Adekanbi M. L., Alaba E. S., John T. J., Tundealao T. D., and Banji T. I. «Soiling loss in solar systems: A review of its effect on solar energy efficiency and mitigation techniques» Cleaner Energy Syst., vol. 7, Apr. 2024.

УДК 621.311:621.311.25

СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ НА ОСНОВІ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ІЗ СИСТЕМОЮ АВТОМАТИЧНОГО СТЕЖЕННЯ ФОТОПАНЕЛІ ЗА СОНЦЕМ

Галько С. В., к.т.н., доц., e-mail: galkosv@gmail.com
Галько Т. І., ст. викл., e-mail: halkotatiana@gmail.com
Зеленков Д. М., асп., e-mail: zelia_12@ukr.net
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність дослідження. В умовах підвищення вартості електроенергії та забезпечення вимог до енергоефективності промислових і побутових об’єктів постає завдання створення та впровадження сучасних методів управління енергетичними об’єктами. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячної енергії, і сучасних когенераційних перетворювачів, а саме циліндричних когенераційних фотоелектричних модулів (ЦКФЕМ) є перспективним підходом для зниження навантаження на основну мережу, а також зменшення викидів вуглекислого газу [1].

ЦКФЕМ забезпечують не тільки генерацію електроенергії, але й допомагають підтримувати необхідний температурний режим фотоелементів і використовувати надлишкове тепло від фотоелементів, що охолоджуються, для господарчих потреб [2]. Для підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій (СЕС) на 25...30% використовуються системи автоматичного стеження ЦКФЕМ за сонцем. **Актуальність** обраної тематики обумовлена тим, що оптимізація роботи такого електротехнічного комплексу вимагає врахування великої кількості факторів: інтенсивності сонячного випромінювання, погодних умов, поточних навантажень на систему та інших параметрів, що не досягають максимальної енергоефективності [3,4].

Мета дослідження – розробка системи автоматичного стеження сонячних фотопанелей на основі ЦКФЕМ за сонцем.

Основні матеріали досліджень. Для підвищення ефективності роботи СЕС, яка складається з фотопанелей (ФП) на основі ЦКФЕМ, запропонована система автоматичного стеження за сонцем, функціональна схема якої наведена на рисунку 1. Автоматизована система містить послідовно з'єднані сонячну (ФП) 1 з ЦКФЕМ, блок управління зарядки-розрядки 2, акумулятор 3, підключений до споживача 4 постійного струму, блок фотодатчиків 5 положення сонця, через підсилювач-формувач сигналу 6, підключений до блока 7 керуючої логіки, який за допомогою драйвера 8 азимутального та зенітального каналу крокових двигунів 9 забезпечує поворот ФП 1 за сонцем, інфрачервоні (ІЧ) переривники 10, дисплей 11, блок 12 введення інформації, поворотний механізм 13. Блок фотодатчиків 5 положення сонця, розташований на чотирьох гранях приймальної піраміди 14, кут нахилу яких становить 45°.

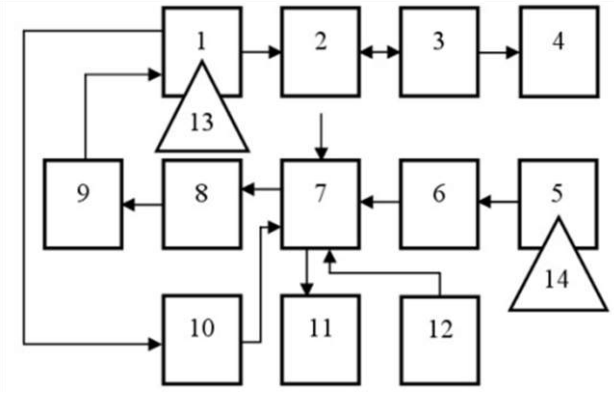


Рисунок 1 – Система автоматичного стеження фотопанелі за сонцем на основі ЦКФЕМ

Для контролю кінцевих положень ФП 1 встановлені ІЧ переривники 10, сигнал яких поступає до блока 7 керуючої логіки. Інформація щодо поточної генерованої потужності виводиться на дисплей 11. Ручний режим роботи та налаштування пристрою забезпечується за допомогою блока 12 введення інформації. Напруга з виходу ФП 1 поступає на блок 2 управління зарядки-розрядки, який подає інформацію про поточне генерування потужності на мікроконтролер 7. При наявності достатнього рівня генерованої потужності починається заряд акумуляторної батареї 3. В пристрої реалізований принцип пошуку положення сонця за допомогою блока фотодатчиків 5. Сигнал фотодатчиків 5 поступає на підсилювач-формувач

сигналу 6, де відбувається його обробка для сумісності з мікроконтролером 7. Мікроконтролер 7 виконує розрахунок положення сонця, формує керуючий сигнал драйверу 8 азимутального та зенітального каналу шагових двигунів 9, і тим самим забезпечує поворот ФП 1 за сонцем. Зміна положення робочої точки відбувається, якщо кут положення сонця різниться з кутом нахилу ФП більш ніж на 10°. Пристрій являє собою два незалежних модуля, які з'єднані між собою шлейфами.

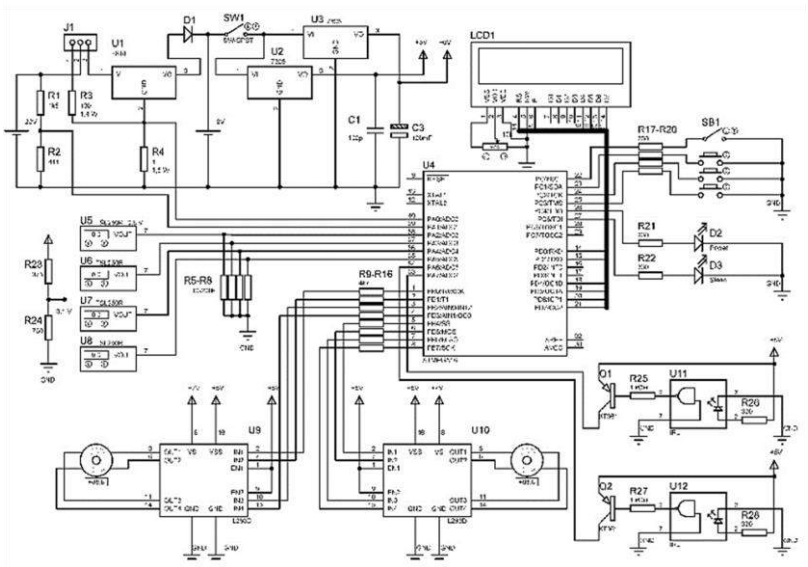


Рисунок 2 – Схема електрична принципова керування поворотним механізмом ФП з ЦКФЕМ

Перший модуль містить 4 фотодатчика, які спрямовані під кутом 45° до денного сонцестояння і фіксує кут положення сонця по відношенню до Землі. Другий модуль – система управління поворотним механізмом, яка складається з таких функціональних блоків: 1) блок керування живленням і розподілом накопичуваної енергії; 2) блок керуючих сигналів з індикацією; 3) драйвера крокових двигунів.

У робочому режимі на дисплей виводиться інформація про стан, джерела сигналів, поточна напруга та струм заряду батареї. Схема електрична принципова керування поворотним механізмом ФП з ЦКФЕМ приведена на рисунку 2. У пристрої використані фотодатчики типу APDS-9007-020.

Висновок. Попередні дослідження і досвід наших партнерів показали, що ефективність рухомих ФП зростає на 25... 30%, але відповідно зростають і витрати на власні потреби, зокрема на роботу електропривода для обертання ФП за сонцем. Крім того, робота діючих установок потребує збільшення відчуження земельної території. Тому для впровадження поворотних ФП у виробництво знадобиться індивідуальне обґрунтування кожної установки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Галько С.В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. Мелітополь: ТДАТУ. 2019. Вип. 19, т. 3. С. 130-141. https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141.

2. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф., м. Луцьк, 10 квіт. 2020 р. Луцьк: МЦНД. 2020. Т. 1. С. 83-90. https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10.

3. Галько С. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько, В. Я. Жарков, А. В. Жарков. Мелітополь: Люкс, 2019. 215 с.

4. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. Integración de las ciencias fundamentals y aplicadas en el paradigm de la sociedad post-industrial: Colección de documentos cientificos «ΛΌΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Cientifica y Práctica, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. Vol. 2. P. 39-44. https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10.

УДК 620.91

МОДЕЛЮВАННЯ Й АНАЛІЗ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО НАДХОДЖЕННЯ ТЕПЛОТИ

Головко В. М., д.т.н., проф., e-mail: golovkovm@ukr.net
Бережнюк М. М., асп., e-mail: bermukola@gmail.com
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Актуальність дослідження. Упровадження двигунів Стірлінга як екологічно чистих джерел енергії для децентралізованої генерації потребує подолання ключового обмеження – їхньої залежності від стабільності теплового потоку. Особливо це стосується систем, що використовують сонячну енергію, якій властива значна мінливість. Ефективне проектування та керування такими системами неможливе без глибокого розуміння динамічних процесів, що виникають при змінних умовах надходження теплоти, що і зумовлює необхідність їх детального моделювання.

Метою дослідження є розробка імітаційної моделі для дослідження поведінки двигуна Стірлінга в умовах нестабільного теплопідведення та оцінка ефективності заходів, спрямованих на стабілізацію його роботи, зокрема, шляхом використання додаткового джерела енергії (електронагрівача).

Основні матеріали досліджень. Основним інструментом дослідження стала комплексна імітаційна модель двигуна Стірлінга, розроблена в середовищі Simulink. Модель включає всі ключові компоненти реальної системи: термодинамічний контур двигуна з поршнем-витіснювачем та робочими поршнем, систему регенерації теплоти, механічну систему передачі моменту та електричний генератор.

Перед розробкою моделі було проведено порівняльний аналіз існуючих математичних підходів до моделювання двигунів Стірлінга – від найпростіших емпіричних методів нульового порядку до складних багатовимірних CFD-моделей. Для вирішення задачі дослідження динамічних процесів за умов нестабільного теплопідведення було обрано адіабатичну модель другого порядку. Цей вибір обґрунтовано тим, що даний підхід є раціональним компромісом між адекватністю опису термодинамічних процесів та обчислювальною ефективністю, що дозволяє проводити тривалі імітаційні експерименти з доцільними витратами часу.

Модель другого порядку, реалізована в дослідженні, ґрунтується на поділі двигуна на п'ять основних контрольних об'ємів: простір стиснення, охолоджувач, регенератор, нагрівач та простір розширення. Для кожного з цих об'ємів формулюються та розв'язуються рівняння балансу маси та енергії, що дозволяє відстежувати зміни тиску, температури та масових витрат робочого тіла протягом усього робочого циклу. Особливістю моделі є врахування ключових втрат, таких як втрати тиску в теплообмінниках, втрати тепла через стінки та механічні втрати, що забезпечує високу ступінь відповідності моделі реальним процесам.

За допомогою розробленої моделі було проведено серію імітаційних експериментів, для оцінки впливу нестабільності зовнішнього джерела теплоти (енергії надходження від Сонця) на функціонування всієї енергетичної установки. Сценарії експериментів передбачали раптове зниження температури нагрівача на різні проміжки часу, що імітувало реальні умови експлуатації сонячних концентраторних систем.

Експериментально доведено, що застосування додаткового джерела енергії дозволяє ефективно компенсувати дефіцит теплоти та повністю усунути простої системи, забезпечуючи неперервність виробництва електроенергії. Це призводить до значного зростання сукупної виробленої енергії порівняно з режимом роботи без додаткового джерела енергії. Водночас, аналіз енергетичного балансу показав, що економічна доцільність такого рішення критично залежить від загальної енергоефективності системи. Для досягнення позитивного енергобалансу необхідний високий ККД перетворення теплової енергії в електричну.

Висновок. Розроблена імітаційна модель є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації роботи енергетичних установок на основі двигуна Стірлінга. Доведено, що використання додаткового джерела енергії є надійним способом підвищення стійкості та неперервності роботи системи в умовах нестабільного надходження теплоти. Однак, практична реалізація такого підходу вимагає ретельного техніко-економічного обґрунтування, оскільки його ефективність безпосередньо залежить від досягнутого рівня ККД всієї енергетичної установки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Joseph Adhemar, Araoz Ramos. Thermodynamic analysis of Stirling engine systems. Doctoral thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Department of Energy Technology, Division of Heat and Power Technology, Stockholm, 2015.

2. MATLAB Help Center. Gamma Stirling Engine. URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/gamma-stirling-engine.html (дата звернення: 12.10.2025).

УДК 631.563:620.91

ТЕПЛИЧНЕ ГОСПОДАРСТВО ТА СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА

Гулевський В. Б., к.т.н., доц., e-mail: vadym.hulevskyi@tsatu.edu.ua
Постол Ю. О., к.т.н., доц., e-mail: yulia.postol@tsatu.edu.ua
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність дослідження. Тепличне господарство є стратегічно важливою галуззю аграрного сектору України, що забезпечує стабільне виробництво овочевої продукції незалежно від сезонних змін клімату. Завдяки можливості створення контрольованих умов вирощування, теплиці дозволяють досягати високої врожайності, забезпечувати якість продукції та її безперервну реалізацію протягом усього року. Це особливо важливо в умовах глобальних кліматичних змін, нестабільності постачання продовольства та зростання попиту на свіжу продукцію.

Однак, попри агротехнічні переваги, розвиток тепличного сектору в Україні стикається з низкою системних економічних викликів. Одним із найгостріших є постійне зростання вартості енергоносіїв — електро- та теплової енергії, які є критично важливими для функціонування тепличних комплексів. За даними галузевих досліджень, енергетичні витрати можуть становити до 60% у структурі собівартості тепличної продукції. Такий рівень витрат суттєво знижує рентабельність виробництва, обмежує можливості для модернізації та інновацій, а також створює ризики для довгострокової економічної стабільності підприємств.

Особливої уваги потребує ситуація в північних та центральних регіонах країни, де кліматичні умови вимагають значних витрат на обігрів теплиць у холодний період року. Це змушує виробників шукати альтернативні рішення, зокрема переміщення господарств до південних регіонів — Одеської, Херсонської та Запорізької областей — де природні умови дозволяють зменшити енергетичне навантаження.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності впровадження сонячної енергетики в тепличному господарстві України як ефективного інструменту зниження енергетичних витрат, підвищення рентабельності виробництва та забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

Основні матеріали досліджень. У межах дослідження було використано широкий спектр джерел, що дозволили комплексно оцінити потенціал впровадження сонячної енергетики в тепличному господарстві України. Зокрема, застосовано [1–4]:

- галузеві звіти та аналітичні матеріали профільних аграрних асоціацій, які містять дані щодо структури витрат, рівня енергоспоживання, рентабельності виробництва та регіональних особливостей функціонування тепличних комплексів;
- кліматичні дані південних регіонів України (Одеської, Херсонської та Запорізької областей), що характеризуються високим рівнем сонячної інсоляції, тривалим світловим днем та сприятливими умовами для генерації електроенергії з відновлюваних джерел;
- технічні характеристики фотоелектричних панелей, адаптованих для аграрного використання, включаючи показники ефективності, прозорості, терміну служби, можливості інтеграції в конструкцію теплиць та впливу на агротехнічні параметри;
- економічні моделі енергоефективності, які дозволяють оцінити вплив впровадження сонячної генерації на загальну структуру витрат, термін окупності інвестицій, рівень автономності об’єктів та потенціал зниження собівартості продукції.

Дослідження проводилось у кілька етапів:

- аналітичний етап — здійснено аналіз статистичних даних щодо енергоспоживання тепличних господарств, визначено критичні точки витрат та залежність рентабельності від тарифів на енергоносії;
- регіональний етап — обґрунтовано вибір південних регіонів як найбільш перспективних для впровадження сонячної енергетики, враховуючи кліматичні переваги та доступність земельних ресурсів;
- моделювання енергогенерації — розраховано потенціал виробництва електроенергії залежно від площі покриття панелями, кута нахилу, типу модулів та середньорічної інсоляції;
- техніко-економічна оцінка — визначено терміни окупності, вплив на собівартість продукції, рівень енергетичної незалежності, а також можливості накопичення енергії для автономного функціонування;
- агротехнічний аналіз — досліджено вплив прозорості панелей на фотосинтетичну активність рослин, мікроклімат теплиці, рівень освітлення та температурний режим.

Результати дослідження підтвердили високий потенціал використання сонячної енергетики в тепличному господарстві України.

Висновок. Основні висновки можна сформулювати наступним чином:

- фотоелектричні панелі здатні покривати від 30% до 70% потреб теплиці в електроенергії, залежно від регіону, типу панелей та конфігурації системи. Це дозволяє суттєво знизити витрати на електроенергію, які є однією з найбільших статей у структурі собівартості продукції;
- термін окупності інвестицій у сонячну енергетику становить 4–6 років, що є прийнятним для більшості фермерських господарств. Після цього періоду система забезпечує стабільну економію та підвищення рентабельності виробництва;
- впровадження сонячних систем дозволяє зменшити залежність від централізованих постачальників енергії, що особливо актуально в умовах нестабільного енергопостачання або зростання тарифів;
- фотоелектричні панелі можуть виконувати функцію затінення, що позитивно впливає на мікроклімат теплиці в літній період, знижуючи перегрівання рослин та сприяючи оптимізації температурного режиму;
- зменшення споживання традиційних енергоносіїв сприяє скороченню викидів парникових газів, що відповідає цілям екологічної модернізації аграрного сектору та принципам сталого розвитку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кузнєцов, М. П., & Лисенко О. (2023). Забезпечення балансу енергії в локальній системі з відновлюваною генерацією. *Відновлювана енергетика*, (1(72), 6-18. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72).6-18

2. Hulevskyi V., Stopin Y., Postol Y., Dudina M. Ex-perimental Study of Positive Influence on Growth of Seeds of Electric Field a High Voltage. In: Nadykto, V. (eds) Modern Development Paths of Agricultural Production. Springer, Cham., 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_36

3. Лапчинський, В. В., Лакуста, А. А., & Хмелянчишин, Ю. В. (2024). Вплив кліматичних змін на агрономію: оцінка та заходи адаптації. *Таврійський науковий вісник: Агрономія*, (137), 62–70. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.60

4. Гаєвський, О. Ю. (2023). *Фотоенергетика. Частина І: Сонячна радіація і фотоелектричні модулі*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

УДК 621.311.243:621.316.925:614.84

ОСОБЛИВОСТІ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІЗ ПОШКОДЖЕНИМИ ФОТОМОДУЛЯМИ У ПРИФРОНТОВИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

Дорошенко А. М., асп., e-mail: andrewd.biz@gmail.com
Коломієць Д. П., ст. викл., e-mail: dmko2023@i.ua
Серьогін О. О., д.т.н., проф., e-mail: Seryoginoo@ukr.net
Національний університет харчових технологій

Актуальність дослідження. У прифронтових регіонах України сонячні електростанції часто є одним із небагатьох стабільно діючих джерел електропостачання. Поряд із ними, звичайно, застосовуються й дизельні або бензинові генератори, однак їхня експлуатація ускладнена дефіцитом пального, складністю логістики та підвищеними ризиками транспортування палива. Разом із тим, сонячні фотомодулі, як і інша енергетична інфраструктура, є об’єктами ворожих атак і зазнають механічних пошкоджень від прямих попадань, уламків та вибухових хвиль. Подальша експлуатація таких пошкоджених панелей створює потенційно небезпечні умови — локальний перегрів, пробій ізоляції та виникнення дугових розрядів постійного струму (DC-дуга), що можуть стати причиною займання та поширення пожежі в межах PV-масиву.

Метою дослідження є аналіз безпечності експлуатації сонячних електростанцій із механічно пошкодженими фотомодулями та розробка заходів, що дозволяють мінімізувати ризики займання під час експлуатації таких систем.

Додатковим стимулом до вивчення цієї теми стали численні публікації та відеоматеріали користувачів у відкритих джерелах, де наголошується, що навіть пошкоджені панелі продовжують генерувати електроенергію. Така практика викликає питання: наскільки безпечна подібна експлуатація в умовах високої напруги постійного струму, характерних для сучасних PV-систем?

Основні матеріали досліджень. На фото (рис. 1) зображена масштабна пожежа в полі сонячних панелей, імовірно спричиненої пошкодженням фотомодулів.

Рисунок 1 – Особливості горіння сонячних модулів [1]

Аналіз подібних випадків потребує розгляду кількох ключових аспектів.

По-перше, слід визначити фізичну природу займання: чи могла пожежа бути наслідком внутрішнього короткого замикання у фотомодулі через тріщини та пробій ізоляції, чи її спричинила DC-дуга між струмопровідними елементами, що втратили контакт.

По-друге, важливо оцінити потенційне тепловиділення в таких умовах для сучасних фотомодулів потужністю 450–750 Вт у складі PV-стрінгів із робочою напругою до 1000 В. Якщо між сусідніми шинами або комірками утворюється низькоомний місток (наприклад, уламок металу), то зазвичай при напрузі модуля близько 50 В і струмі короткого замикання до 16 А частина комірок, а в гіршому випадку вся панель стає закороченною. Тепловиділення при цьому розподіляється рівномірно по комірках і частково на містку, який

швидко розплавляється чи перегорає разом із шиною — процес короткочасний і самозгасаючий.

Інший сценарій — між контактами виникає проміжок (тріщина, розрив з'єднання), по якому продовжує текти струм усього стрінга (до 16 А при 600–1000 В DC). Через індуктивність ланцюга струм не зникає миттєво, і накопичена енергія вивільняється у вигляді електричної дуги з температурою 3000–6000 °C. Така дуга може існувати тривалий час, доки зберігається джерело струму, причому її можуть підживлювати й паралельні стрінги. У результаті формується стійке локальне тепловиділення та плазмовий розряд, здатний спричинити займання матеріалів модуля.

Із цього виникають прості і водночас обов'язкові рекомендації. При модернізації:

1. З'єднувати стрінги паралельно потрібно тільки через діоди, щоб у випадку виникнення DC-дуги один стрінг не підживлював інший.

2. Потрібно зробити так, щоб напруга розімкнутого кола проміжку не дорівнювала напрузі всього стрінгу, а обмежувалася максимальною напругою V_{oc} панелі. Для цього достатньо кожну панель зашунтувати додатковими зовнішніми діодами 1, 2, 3 тощо (рис. 2, приклад для 3 панелей).

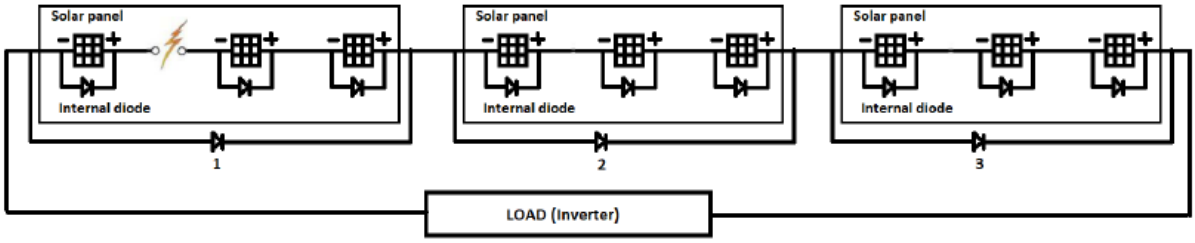


Рисунок 2 – Приклад принципової схеми сонячного PV-стрінгу з трьох модулів із додатковими діодами 1, 2, 3

Діод відкривається, коли між його анодом і катодом з'являється достатня зворотна напруга, тобто коли напруга на проміжку зрівняється з V_{oc} панелі.

3. При проектуванні нової системи слід відмовитися від інверторів з високовольтними АКБ, які зазвичай потребують і високовольтних PV-стрінгів. А використовувати, наприклад, 16s LifePo4 акб з робочою номінальною напругою 51,2 В, для заряджання якого достатню 100–150 В MPPT контролерів (наприклад Victron Energy. Згідно документації контролер буде працювати за напруги на PV на +5 В більше максимальної напруги батареї (для 16s – 58,4 В).

Висновки. За нормальних умов експлуатації роздільні діоди рекомендують ставити тільки у випадку, якщо кількість паралельних стрінгів 3 і більше. При цьому застосовують високовольтні стрінги (менша сумарна довжина кабелів) і кожну панель не шунтують, тому що там, як правило, вже є три групи байпас-діодів. Разом з тим, на наш погляд в контексті українського дійсності окреме шунтування є доречним:

1. Сонячні станції – часто єдине джерело живлення і коли мережа пошкоджена, панелі продовжують генерувати навіть з пробоями, тріщинами, механічними дефектами. У багатьох випадках швидко замінити їх неможливо – ні часу, ні грошей, ні доступу до них. При цьому умови експлуатації стають надзвичайно небезпечні: пробої у вологому середовищі; уламки – дуга в сотні вольт постійного струму та гарантоване займання. Звичайно можна залишити панель і дати їй можливість умовно безпечно працювати. Це фактично найдешевший аналог системи «module-level shutdown», але без електроніки (не потрібно живлення, комунікації, спрацьовує автоматично при пошкодженні).

2. Наразі у нас немає ресурсів замінювати пошкоджені панелі, але є електрики, які можуть поставити розділяючі та шунтуючі діоди у польових умовах. В умовах війни такий підхід не просто доцільний, а необхідний. Це водночас простий, пасивний, дешевий і ефективний «вогнегасник» для PV-систем, які не можна регулярно обслуговувати.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. URL: https://youtu.be/ARBJk4hRy_E?si=L4jkYa_Pvpt2VdVL.

УДК 621.311.243:004.9:551.521

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА РОБОТУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ЗАСОБАМИ MATLAB

Дяденчук А. Ф., к.т.н., доц., e-mail: alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua
Філіпович Є. В., магістрант, e-mail: zhenyaq234@gmail.com
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність дослідження. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні спрямований на підвищення частки екологічно чистих джерел енергії, серед яких сонячні фотоелектричні станції займають провідне місце. Продуктивність сонячних панелей суттєво залежить від зовнішніх факторів. Так, згідно з дослідженням [1], підвищення температури негативно впливає на ефективність кремнієвих фотоелементів, знижуючи напругу холостого ходу та, відповідно, вихідну потужність. Типовий температурний коефіцієнт для кристалічного кремнію становить від –0,3% до –0,5% на кожен градус, що підтверджено у [2]. Це означає, що при зростанні температури на 10 °C втрати потужності можуть сягати 4–5 %, що є критичним для регіонів із жарким кліматом. З іншого боку, другим ключовим фактором, що визначає продуктивність сонячної електростанції є інсоляція. В [3] зазначено, що збільшення інсоляції з 400 до 1000 Вт/м² може призвести до зростання вихідної потужності майже в 2,5 рази.

Однак експериментальні дослідження таких впливів потребують значних витрат, тому ефективною альтернативою є комп'ютерне моделювання. Серед сучасних інструментів, Matlab надає можливість створювати аналітичні моделі фотоелектричних систем, візуалізувати результати та адаптувати фотоелектричні системи до регіональних кліматичних особливостей [4].

Таким чином, аналіз сучасної наукової літератури підтверджує доцільність використання комп'ютерного моделювання для оцінки впливу метеорологічних умов на роботу фотоелектричних станцій. Застосування Matlab як інструменту моделювання дозволяє точно прогнозувати поведінку систем у різних кліматичних сценаріях, що є особливо актуальним для енергетичного планування в Україні.

Мета дослідження – кількісне моделювання впливу метеорологічних умов (температури навколишнього середовища та сонячної радіації) на вихідну потужність фотоелектричної станції засобами Matlab.

Основні матеріали досліджень. Робота сонячного елемента описується залежністю:

$$P_{out} = P_{ref} \cdot \frac{G}{G_{ref}} \cdot [1 + k_T(T - T_{ref})],$$

де P_{out} – вихідна потужність панелі, Вт; P_{ref} – номінальна потужність при стандартних умовах; G – поточна інсоляція, Вт/м²; G_{ref} – стандартна інсоляція; T – температура навколишнього середовища, °C; T_{ref} – температура за стандартних умов; k_T – температурний коефіцієнт потужності.

Таблиця 1 – Вихідні дані для моделювання

Параметр	Значення / Діапазон	Коментар
Номінальна потужність панелі, Вт	250	Типове значення для стандартної панелі
Стандартна інсоляція, Вт/м²	1000	Відповідає стандартним умовам тестування
Поточна інсоляція, Вт/м²	200, 300 … 1000	Крок 100 Вт/м²
Температурний коефіцієнт потужності, 1/°C	–0.004	Для монокристалічного кремнію
Температура за стандартних умов, °C	25	Відповідає стандартним умовам тестування

На основі аналітичної моделі побудовано тривимірний графік (рис. 1), що відображає залежність вихідної потужності фотоелектричної станції від температури та інсоляції. Зі зростанням температури потужність зменшується (на 4–5 % на кожні 10 °C), що узгоджується з негативним температурним коефіцієнтом кремнієвих панелей. Водночас підвищення інсоляції від 200 до 1000 Вт/м² спричиняє майже лінійне зростання потужності. Максимальна ефективність досягається за високої інсоляції та температури близької до стандартної (25 °C). Отримані результати дозволяють прогнозувати продуктивність фотоелектричних систем у різних кліматичних умовах України, що важливо для енергетичного планування та вибору обладнання.

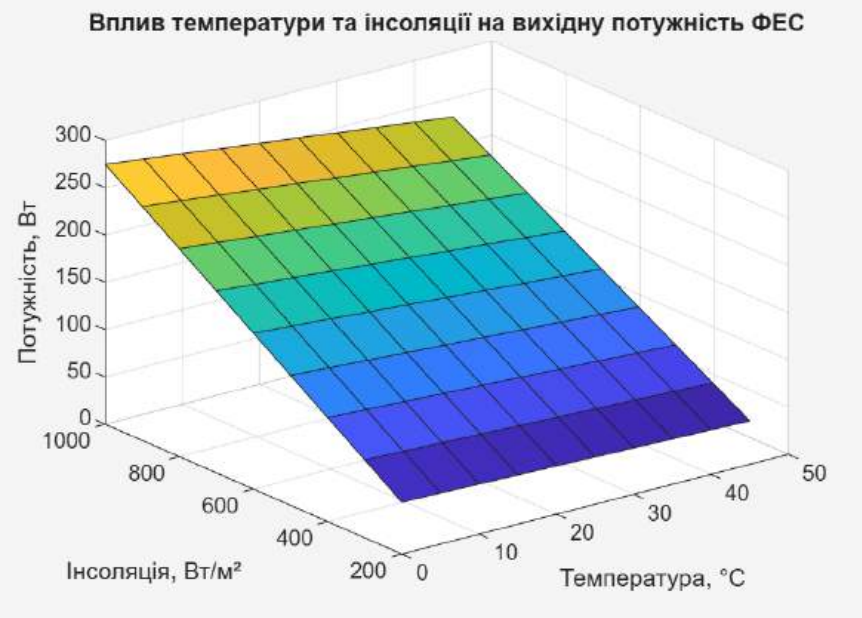


Рисунок 1 – Розрахунок потужності при різних поєднаннях температури та сонячної інсоляції, Matlab

Висновок. Моделювання показало, що зі зростанням температури навколишнього середовища на кожні 10 °C вихідна потужність зменшується на 4–5 %. Збільшення інсоляції з 400 до 1000 Вт/м² спричиняє пропорційне зростання потужності майже у 2,5 рази. Максимальна ефективність досягається при температурі панелі близько 25 °C та високому рівні сонячного випромінювання. Модель може бути адаптована для прогнозування сезонної продуктивності фотоелектростанцій у конкретних регіонах України, що відкриває перспективи для інтеграції в енергетичні стратегії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sun C., Zou Y., Qin C., Zhang B., Wu X. Temperature effect of photovoltaic cells: a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. Vol. 5. P. 2675–2699.

2. Skoplaki E., Palyvos J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009. Vol. 83, Issue 5. P. 614–624.

3. Navneet Khuran N., Pareek S. Insolation Effect on Solar Photovoltaic Performance Parameters / R. Agrawal, J.K. Jain, V.S. Yadav, V.K. Manupati, L. Varela (eds). // Recent Advances in Industrial Production. ICEM 2020. Singapore : Springer, 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering.

4. Cirak B. Modelling and Simulation of Photovoltaic Systems Using MATLAB/Simulink. *WSEAS Transactions on Power Systems.* 2023. Vol. 18. Pp. 49-56.

УДК 631.311

МАЙБУТНЄ ТА МОЖЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ УКРАЇНИ

Моголівець А. С., магістр, e-mail: petrenkomm@ukr.net
Дудніков С. М., к.т.н., доц., e-mail: dydnikov@btu.kharkov.ua
Попадченко С. А., магістр, ст. викл., e-mail: svanp111@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У зв'язку з дефіцитом енергетичних ресурсів, особливо для потреб паливно-енергетичного комплексу та теплоелектроцентралей, постає завдання пошуку нових джерел енергії. Розвиток конкурентоспроможного сільськогосподарського виробництва потребує не лише впровадження інноваційних технологій і цифрових систем управління, а й створення ефективних рішень для стабільного енергозабезпечення. Такі рішення передбачають використання автономних систем електропостачання, що працюють на базі як традиційних, так і відновлюваних джерел енергії, з можливістю підключення до зовнішніх мереж і забезпечення мобільності в експлуатації.

Мета дослідження — визначити перспективи та напрямки інтеграції відновлюваних енергорішень у національному аграрному секторі для забезпечення його випереджального розвитку.

Основні матеріали досліджень. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва є проєктування та впровадження систем безперебійного електропостачання, що включають автономні підсистеми на базі як традиційних, так і відновлюваних джерел енергії. Відтак пріоритет досліджень і практичних рішень зміщується до першочергового запровадження енергозберігальних технологій і ВДЕ. Такий підхід зумовлений, з одного боку, низьким рівнем ресурсозбереження в аграрній діяльності, а з іншого — суттєвим соціальним ефектом від їх поширення.

Порівняльний аналіз галузей за екологічними, економічними та безпековими критеріями свідчить про найвищі перспективи сонячної енергетики [1]. У активних сонячних системах перетворення випромінювання на тепло забезпечується механічним і електричним обладнанням (теплові колектори, фотоелектричні модулі, насоси, вентилятори). Пасивні системи обходяться без механіки: теплова енергія надходить через архітектурні рішення — орієнтацію будівлі, вікна, стіни, озеленення та інші прийоми залучення сонячного потоку.

Через переривчастий характер інсоляції поодинокі відновлювані джерела часто дають нестабільну генерацію та підвищені експлуатаційні витрати. Тому доцільним є поєднання двох і більше ВДЕ у комбіновані енергосистеми для підвищення виробітку, зниження витрат, мінімізації впливів від спалювання дефіцитного викопного палива та загального підвищення ефективності енергопостачання [3].

Масове розгортання ВДЕ для сільських споживачів істотно прискорюється завдяки закордонному досвіду. У країнах ЄС і США сформовано комплексну нормативно-правову підтримку: демонстраційні програми; податкові пільги та субсидування відсоткових ставок для кредиту чи лізингу; сталі інвестиції в НДДКР, стандартизацію, безпеку, сертифікацію й гарантії; підготовку кадрів на всіх рівнях; залучення приватного капіталу через субсидії, спеціальні тарифні механізми, амортизаційні стимули та фонди чистої енергетики; індустріальну політику для нарощування виробництва обладнання й створення робочих місць; обов'язкове врахування «соціальних витрат» у ціні енергії; включення вартості сонячних систем у кошторис будівництва [2].

Вітрова та сонячна генерація можуть системно інтегруватися за наявності відповідних стратегій: надання системних послуг і зміни до регулювання; розміщення ВДЕ ближче до зон пікового попиту; взаємне доповнення сонця й вітру, паралельний розвиток гідроенергетики (передусім у гірських регіонах); зростання частки локального споживання через комбінацію СЕС і акумуляторів та інструменти керування попитом; інженерна

адаптація конструкцій для кращої мережевої інтеграції; комплексне планування, моніторинг і контроль. Сонячні установки застосовують у системах опалення/охолодження будівель, низько-, середньо- й високотемпературних процесах, для ГВП, сушіння продукції, тепличного господарства, виробництва біогазу тощо. Існує широкий спектр геліотеплиць (із ґрунтовим акумулятором, автономним енергозабезпеченням, замкнутим вологообігом, біоакумулятором; плівкові/скляні, ангарні, малі, підземні).

Існує перспектива використання БГУ як для задоволення власних енергетичних потреб, так і для збагачення біогазу для рівня біометану з подальшим його транспортуванням до газотраспортних (ГТМ) та газорозподільчих (ГРМ) мереж.

Таким чином інтеграція ВДЕ в мережу передбачає:

1) надання ВДЕ системних послуг і відповідні регуляторні оновлення;

2) географічне наближення генерації до центрів попиту;

3) синергію сонця, вітру, гідро та БГУ;

4) зростання частки самоспоживання через СЕС+накопичувачі та DSM;

5) конструктивні удосконалення установок для мережевої сумісності;

6) планування й постійний моніторинг.

Сфери застосування — ОВіК будівель, використання біометану в ГРМ та ГТМ, технологічні процеси виробничих підприємств, ГВП, сушіння, теплиці. Ринкові ціни технологій змінні, тож стратегії слід регулярно оновлювати.

Висновок. Для забезпечення стійкого й конкурентоспроможного розвитку аграрного виробництва України впровадження ВДЕ має відбуватися з урахуванням комплексу стратегічних заходів:

– адаптація національної енергетичної політики до міжнародних норм і стандартів через вивчення передового зарубіжного досвіду;

– впровадження високоефективних технологій генерації енергії з відновлюваних джерел — насамперед сонця та вітру;

– поступове зменшення вуглецевих викидів у межах енергетичного сектору;

– оновлення та модернізація енергетичної інфраструктури, орієнтованої на використання сонячної й вітрової генерації;

– розробка інформаційно-інвестиційного довідника для залучення інвесторів у ВДЕ;

– створення системи професійної підготовки спеціалістів для інтеграції технологій ВДЕ у національну енергомережу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Qawaqzeh M. Development of Algorithm for the Operation of a Combined Power Supply System with Renewable Sources [Electronic resource] / Mohamed Qawaqzeh, Serhii Dudnikov, Oleksandr Miroshnyk, Oleksandr Moroz, Oleksandr Savchenko, Irina Trunova, Volodymyr Pazyi, Dmytro Danylchenko, Oleksiy Iegorov, Serhii Halko, Roman Buinyi IEEE KhPI Week on Advanced Technology : Conference Proceedings, Kharkiv, 03 -07 October 2022. - Kharkiv : KhPI Week, 2022. - Ст. 22186808. - P. 1-4. - DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372

2. Дудніков С. М. Методи підвищення ефективності функціонування комбінованих систем енергопостачання споживачів АПК: дис. … канд. техн. наук: 05.14.01 / Дудніков Сергій Миколайович. – К., 2011. - 278 с.

3. Idzikowski A. Prospects for biogas plant implementation in the unified energy system [Electronic resource] / A. Idzikowski, S. Dudnikov, O. Miroshnyk, O. Savchenko, I. Trunova, V. Paziy, A. Milenin, T. Shchur, S. Halko, O. Burnayev, M. Mazur // System Safety: Human - Technical Facility - Environment : 13th International Conference, Wroclaw, December 1, 2024. - 2024. - Vol. 6, Issue 1. - P. 154-166. - DOI 10.2478/czoto-2024-0017

4. Попадченко С. А. Гібридні електричні мережі – необхідність та перспективи розвитку в Україні/ С. А. Попадченко // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка - Випуск 186 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України».- Харків: ХНТУСГ, 2017. - С. 39-44.

УДК 621.316

СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ – ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ІНСТРУМЕНТ УЧАСНИКІВ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мотайло М. С., асп., e-mail: maksim.motaylo@gmail.com
Мороз О. М., д.т.н., проф., e-mail: moroz.an@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В умовах війни та зростання долі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) системи накопичення енергії стають критично важливими для стабільності мережі. Накопичувачі дозволяють акумулювати надлишкову енергію і віддавати її під час піків або надзвичайних ситуацій. Накопичувачі також суттєво сприяють інтеграції ВДЕ: в разі перевищення прогнозованої генерації, накопичувачі енергії здатні зберегти її і відпустити в мережу в години максимальних навантажень, чи замістити віддачею накопиченої енергії генерацію в разі нестачі останньої, запобігаючи накладанню штрафів на виробника енергії. Також установки зберігання енергії (УЗЕ) створюють нову нішу в бізнесі — закупівля енергії за нижчою ціною та продаж на внутрішньодобовому або балансуючому ринку за вищою.

Мета дослідження – дослідження динаміки впровадження систем зберігання енергії в Україні, методів отримання фінансової вигоди від них.

Основні матеріали досліджень. У зв'язку зі зростанням частки відновлюваної генерації та викликами воєнного часу в Україні зростає потреба в гнучких резервах електроенергії. За розрахунками НЕК «Укренерго», наступні 10 років енергосистемі може знадобитися ~1,5 ГВт додаткових потужностей накопичення [1]. Уряд також ініціює соціальні проєкти: наприклад, у 2024 році планувалося забезпечити медичні заклади 2000 систем зберігання електроенергії в поєднанні з сонячними електростанціями (СЕС) [2], [3]. Проте більшість введених в експлуатацію УЗЕ — це комерційні проєкти приватного сектору.

Першу промислову установку зберігання в Україні було побудовано ДТЕК: літій-іонна батарея потужністю 1 МВт, ємністю 2,25 МВт·год, введена в експлуатацію 20 травня 2021 року на майданчику ДТЕК Запорізької ТЕС в Енергодарі [4], зараз установка знаходиться під окупацією. Проєкт було реалізовано ДТЕК з використанням обладнання Honeywell і SunGrid, він вперше в Україні продемонстрував можливість стабілізації частоти за допомогою акумуляторної системи. У вересні 2025 року ДТЕК у партнерстві з американською Fluence ввела в експлуатацію найбільший в Україні комплекс УЗЕ загальною потужністю 200 МВт (ємністю 400 МВт·год) [5]. Проєкт включає шість об'єктів ємнісних накопичувачів (кожний — 20-50 МВт) у Київській та Дніпропетровській областях. Інвестиції становили близько €125 млн, система здатна забезпечити енергією до 600 тис. домогосподарств протягом 2 годин.

Група компаній KNESS в межах виграних спеціальних аукціонів з допоміжних послуг завершила будівництво восьми парків накопичувачів різної потужності з літій-іонними батареями на півдні та в центрі України. Сумарна ємність цих установок понад 100 МВт·год. Об'єкти KNESS сертифіковані оператором ринку і з 1 жовтня 2025 р. надають послуги з автоматичного резерву відновлення частоти та підтримки частоти. За даними компанії, на цей проєкт спрямовано близько $40 млн інвестицій [6]. Реалізація проєкту будівництва УЗЕ компанією Ekotech Ukraine підтвердила високу економічну привабливість будівництва таких установок, дохідність яких може складати біля $120000 на 1 МВт·год [7].

За підсумками 2021—2025 років в Україні введено у дію кілька сотень мегават акумуляторної потужності: від перших пілотних сховищ до масштабних комплексів. Це свідчить про те, що ринок промислових УЗЕ у нашій енергосистемі активно формується. Подальший розвиток УЗЕ підтримується урядовими програмами та законодавством, і, як

очікується, в найближчі роки можуть з’явитися нові великі проєкти, як державні, так і приватні [1], [6].

Правова база дозволяє власникам УЗЕ ставати учасниками ринку енергії і продавати її з акумуляторних батарей на ринку «на добу наперед» та внутрішньодобовому, що визначено в [8], [9], [10]. Оскільки ціна на ринку електроенергії не є сталою [11], компанія-власник або приватний власник задля отримання фінансової вигоди може закуповувати електричну енергію за цінами ринку на добу наперед (РДН) або в години найнижчої вартості електричної енергії, відпускаючи її на внутрішньодобовому ринку (ВДР) за вищими цінами. Таке використання різниці цін на ринку називається «арбітражем». Ринок РДН дозволяє формувати базові ціни на генерацію на добу наперед, а ВДР дає змогу виробникам і споживачам коригувати плани протягом доби. Балансуючий ринок енергії, який запущено з 2019 року, має покривати відхилення між прогнозом і фактичним споживанням — його навантаження зростає через стохастичність роботи ВДЕ. Водночас двосторонні договори стимулюють інвестиції особливо в «зелену» генерацію, даючи довгострокову цінову передбачуваність завдяки «зеленому» тарифу.

Висновок. Окрім ролі «енергетичного щита» країни, здатного захистити критично важливі об’єкти після атак по український енергетиці чи інших надзвичайних ситуацій, УЗЕ використовуються як джерело економічного прибутку, що має стимулювати їх більш активний розвиток. Накопичувачі забезпечують резерви потужності і дають учаснику енергетичного ринку гнучкість. Законодавство України сприяє розвитку енергетичного сектора країни, залученню до нього нових учасників, особливо власників електростанцій працюючих на ВДЕ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ukrinform. В Україні запрацював найбільший комплекс систем зберігання енергії на 200 МВт. Укрінформ – актуальні новини України та світу. URL: https://surl.lt/vaamfd (дата звернення: 18.10.2025).

2. Уряд планує у 2024 році надати медзакладам 2000 систем зберігання енергії. Українська Енергетика. URL: https://v.gd/JaKRd8 (дата звернення: 18.10.2025).

3. Лікарня на Хмельниччині отримала СЕС потужністю понад 140 кВт. Українська Енергетика. URL: https://v.gd/I1hRhY (дата звернення: 18.10.2025).

4. В Україні запущена перша система промислового накопичення енергії. LIGA.net. URL: https://v.gd/ipPD5z (дата звернення: 18.10.2025).

5. "ДТЕК" та американська Fluence запустили в Україні 200 МВт УЗЕ. Енергореформа. URL: https://v.gd/524kV4 (дата звернення: 18.10.2025).

6. KNESS реалізував понад 100 МВт*год ємності установок зберігання енергії, KNESS. KNESS. URL: https://v.gd/r6e9Lm (дата звернення: 18.10.2025).

7. УкрІнвестКлуб. Забув про Біткоїн: чому я вклав півмільйона доларів у промислові батареї в Україні, 2025. YouTube. URL: https://v.gd/pb5Ztx (дата звернення: 18.10.2025).

8. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії : Закон України від 15.02.2022 № 2046-IX. URL: https://v.gd/HayY7u. (дата звернення: 18.10.2025).

9. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку : Постанова Нац. коміс., що здійснює держ. регулювання у сферах енергетики та комун. послуг від 14.03.2018 № 308 : станом на 23 лют. 2024 р. URL: https://v.gd/iojwo4 (дата звернення: 18.10.2025).

10. Про затвердження Порядку реєстрації учасників оптового енергетичного ринку : Постанова Нац. коміс., що здійснює держ. регулювання у сферах енергетики та комун. послуг від 04.10.2023 № 1812. URL: https://v.gd/RSY3o1. (дата звернення: 18.10.2025).

11. Результати торгів РДН Оператор ринку. URL: https://v.gd/SGmXMf (дата звернення: 18.10.2025).

УДК 621.316.13

ВПЛИВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Оберемок Д. О., асп., e-mail: dimaoberemok1992@gmail.com
Тоберт О. Ю., асп., e-mail: tobert.sasha@gmail.com
Оксенич Р. В., асп., e-mail: okrus785@proton.me
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Розвиток розосереджених джерел енергії (РДЕ) має не лише техніко-економічне, а й значне науково-соціальне значення. Це проявляється, зокрема, у впровадженні сучасних нанотехнологій у сонячних елементах сонячних електростанцій (СЕС) та системах накопичення енергії (СЗЕ), а також у застосуванні SMART-технологій – вимірювальних, облікових, діагностичних систем, систем релейного захисту та автоматики. Використання таких інтелектуальних рішень забезпечує:

- гнучке регулювання вузлових напруг, що є важливими показниками якості електричної енергії;
- ефективне керування напрямками та величинами струмів у лінійних і трансформаторних елементах розподільних мереж, що сприяє запобіганню аварійним перевантаженням;
- зниження частки вартості традиційних видів палива у структурі собівартості електроенергії, відпущеної споживачам;
- зменшення негативного впливу традиційної генерації на довкілля завдяки скороченню її обсягів [1, 2].

Мета дослідження. Динамічний розвиток технологій накопичення електроенергії здатен суттєво трансформувати сучасні енергосистеми. Упровадження накопичувачів сприятиме зниженню попиту на викопні палива, оскільки вони дедалі частіше виконуватимуть функцію балансування електроенергетичних систем, раніше притаманну тепловій генерації. Накопичувачі енергії стають повноцінним елементом енергосистеми поряд із генерацією, передачею, розподілом і збутом, забезпечуючи підвищену гнучкість та економічну ефективність її функціонування.

Основні матеріали досліджень. Основні переваги впровадження систем накопичення енергії полягають у забезпеченні безперебійного електропостачання споживачів, діяльність яких потребує високого рівня надійності, у зниженні втрат електроенергії та потужності в мережах, скороченні потреби в інвестиціях у будівництво нових генеруючих та електромережевих об’єктів, розвантаженні мереж від реактивної потужності, підвищенні їх пропускної здатності та стабілізації напруги у вузлах системи. Крім того, використання накопичувачів сприяє частковій нейтралізації наслідків системних аварій.

Вибір типу накопичувача визначається конкретними умовами його застосування та вимогами до параметрів зберігання енергії – зокрема, необхідної потужності, тривалості зберігання, питомих витрат, коефіцієнта корисної дії, терміну служби, кількості циклів заряду-розряду, а також особливостями територіального розміщення і впливу на довкілля.

Інтеграція сучасних технологій Smart Grid є необхідною умовою ефективного керування розосереджувальними джерелами енергії (РДЕ), зокрема сонячними електростанціями [3]. Наявність значної кількості інверторів у таких системах вимагає розвиненої системи керування та інформаційного обміну, що забезпечує запобігання або усунення понаднормових відхилень електричних параметрів (напруг, струмів, потужностей тощо) на шинах підстанцій і в лініях електропередачі. Це досягається шляхом динамічного регулювання потужності СЕС, гідроелектростанцій та інших джерел генерації.

Основне завдання полягає у відмові від використання фіксованого коефіцієнта потужності та постійної реактивної потужності СЕС, натомість – у впровадженні механізмів гнучкого керування активною та реактивною потужністю РДЕ відповідно до змін

навантаження протягом доби. Системи автоматичного керування РДЕ можуть розміщуватись на значній відстані від об'єктів генерації, тому доцільним є застосування сучасних засобів автоматичного, автоматизованого та диспетчерського керування.

Використання пристроїв дистанційного керування підвищує гнучкість і ефективність експлуатації обладнання електромереж, а також мінімізує негативний вплив СЕС на параметри системи. Більшість сучасних інверторів підтримують функції регулювання реактивної потужності, проте існуючі методи керування напругою в мережах потребують подальшої оптимізації. Необхідно вдосконалювати алгоритми вибору уставок регулювання напруги та коефіцієнтів потужності, а також реалізувати оптимальне керування активною й реактивною потужністю [4].

Таке керування доцільно здійснювати централізовано – через блок керування, розташований у центрі інформаційного обміну та керування (ЦІОК) РДЕ певного району електричних мереж. ЦІОК забезпечує збір і обробку даних про роботу СЕС та формує керуючі сигнали для підтримання оптимальних режимів їх функціонування.

Пристрої централізованого керування повинні враховувати, що в межах однієї ЛЕС можуть працювати потужні інвертори різних виробників. Для їх ефективної взаємодії використовуються різні блоки керування та протоколи обміну даними, а комунікація здійснюється через групи контролерів.

Отримані результати досліджень відкривають можливість удосконалення процесів оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії спільно із системами накопичення енергії [5]. Узгоджене керування генерацією СЕС та СНЕ дозволяє зменшити додаткові втрати електроенергії та підвищити загальну ефективність роботи локальних енергосистем.

Висновок. Використання систем накопичення енергії як окремо, так і в поєднанні із сонячними електростанціями забезпечує узгодження процесів генерації електроенергії з динамікою споживання. Такі системи дозволяють накопичувати надлишкову енергію для її подальшого використання під час пікових навантажень або перебоїв у електропостачанні, а також забезпечують додаткову потужність у побутових чи локальних мережах за потреби.

Результати досліджень свідчать, що в розподільних електричних мережах із розосередженими джерелами генерації, доцільним є створення системи керування потоками потужності з метою зменшення втрат електроенергії під час її транспортування. Ефективність таких систем підвищується за рахунок використання керованих відновлюваних джерел енергії – СЕС із груповими інверторами та вбудованими накопичувачами енергії.

Показано, що розосереджені джерела енергії по-різному впливають на рівень втрат потужності та електроенергії в електричних системах залежно від їхнього робочого діапазону генерації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Dall'Anese E. Distributed optimal power flow smart microgrids / E. Dall'Anese, H. Zhu, G. Giannakis // IEEE Transaction on power electronics. – 2013. – № 3. – P. 1464–1475.

2. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2014.

3. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. Energies. 2023. 16(6). 2638. https://doi.org/10.3390/en16062638

4. Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів / Ю. І. Тугай, В. В. Козирський, О. В. Гай, В. М. Бодунов // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 5.

5. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical Modelling of Cogeneration Photoelectric Module Parameters for Hybrid Solar Charging Power Stations of Electric Vehicles. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397

УДК 621.316.13

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ MICROGRID У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Оксенич Р. В., асп., e-mail: okrus785@proton.me
Мірошник О. О., д.т.н., проф., e-mail: omiroshnyk@btu.kharkiv.ua
Мороз О. М., д.т.н., проф., e-mail: moroz.an@btu.kharkiv.ua
Пазій В. Г., ст. викл., e-mail: pazziy@btu.kharkiv.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У сучасних умовах розвитку енергетичного сектору все більшу увагу приділяють децентралізованим системам електропостачання, здатним ефективно працювати з використанням відновлюваних джерел енергії. Це набуває особливого значення для територій, віддалених від основних енергетичних магістралей, де створення або підтримання централізованих мереж потребує значних фінансових та технічних ресурсів. Саме тому мікромережі виступають одним із ключових напрямів розвитку сучасної енергетики, забезпечуючи автономність, надійність та гнучкість у регулюванні процесів генерації, зберігання й споживання електроенергії [1]. Водночас інтеграція сонячних фотоелектричних установок та інших генераційних джерел у структуру мікромереж супроводжується низкою технічних проблем. Зокрема, нестабільність генерування потужності, залежність від погодних умов та добових коливань сонячної радіації ускладнюють підтримання балансу між генерацією та споживанням.

Одним із перспективних підходів до оптимізації функціонування мікромереж є використання методів прогнозного керування Model Predictive Control далі MPC. Такий підхід дає змогу враховувати очікувані зміни навантаження, стан елементів системи накопичення та прогнозовану генерацію від відновлюваних джерел, що забезпечує стабільніше та енергоефективне функціонування Microgrid. Застосування MPC у системах енергоменеджменту дозволяє підвищити ефективність використання енергії, зменшити втрати й продовжити термін експлуатації обладнання [2, 3].

Моделювання таких систем у середовищі MATLAB/Simulink створює широкі можливості для дослідження динамічних процесів, аналізу поведінки системи в різних режимах роботи та перевірки ефективності алгоритмів керування до їх практичного впровадження.

Мета дослідження полягає в моделюванні гібридної мікромережі з фотоелектричною станцією, акумуляторною системою зберігання енергії та підключенням до основної мережі, із застосуванням прогнозного керування в середовищі MATLAB/Simulink для підвищення ефективності та надійності електропостачання.

Основні матеріали досліджень. У роботі змодельовано однофазну гібридну мікромережу, що включає сонячну генеруючу установку, акумуляторну батарею та підключення до основної електромережі, що показано на рисунку 1. Метою є забезпечення балансу між генерацією, споживанням і накопиченням енергії за змінних умов навантаження.

Контролер батареї керує процесами заряджання та розряджання, підтримуючи стабільність системи. У періоди високої генерації СЕС надлишкова енергія спрямовується на заряд акумулятора, а в години дефіциту батарея віддає енергію для живлення навантаження або компенсації потужності з боку основної мережі.

Моделювання виконано у MATLAB/Simulink з використанням бібліотеки SimPowerSystems. Система містить такі основі елементи: СЕС, накопичувач енергії, контролер батареї, навантаження, лінію розподілу та з'єднання з мережею. Електричні параметри: напруга 230 В, частота 50 Гц, встановлена потужність СЕС рівна 50 кВт.

Для дослідження використано добовий режим із реалістичним профілем інсоляції та навантаження. Пікове споживання досягає 6,4–7,6 кВт у ранкові та вечірні години.

Акумулятор працює у двох інтервалах з 00:00 до 12:00 та з 18:00 до 24:00, забезпечуючи мінімальний перетік енергії з основної мережі.

Проведено тест на стійкість: короткочасне вимкнення одного з навантажень спричинило незначне відхилення напруги, після чого система відновила стабільність протягом 30 с. Отримані результати на рисунку 2 демонструють добовий розподіл потужності СЕС, накопичувача, навантаження та перетоків із мережею.

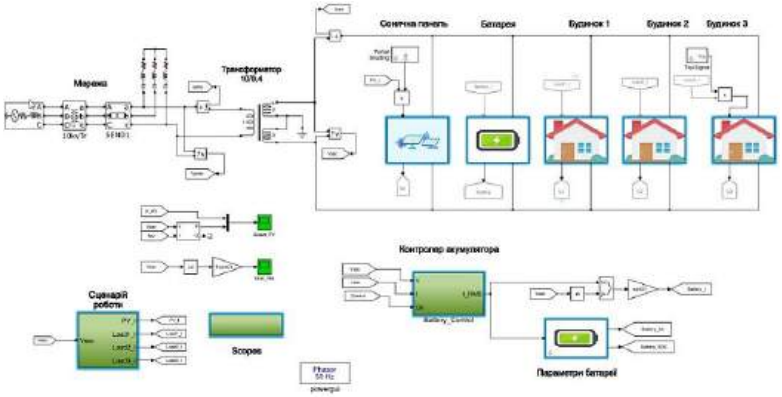


Рисунок 1 – Модель мікромережі в середовищі Matlab/Simulink

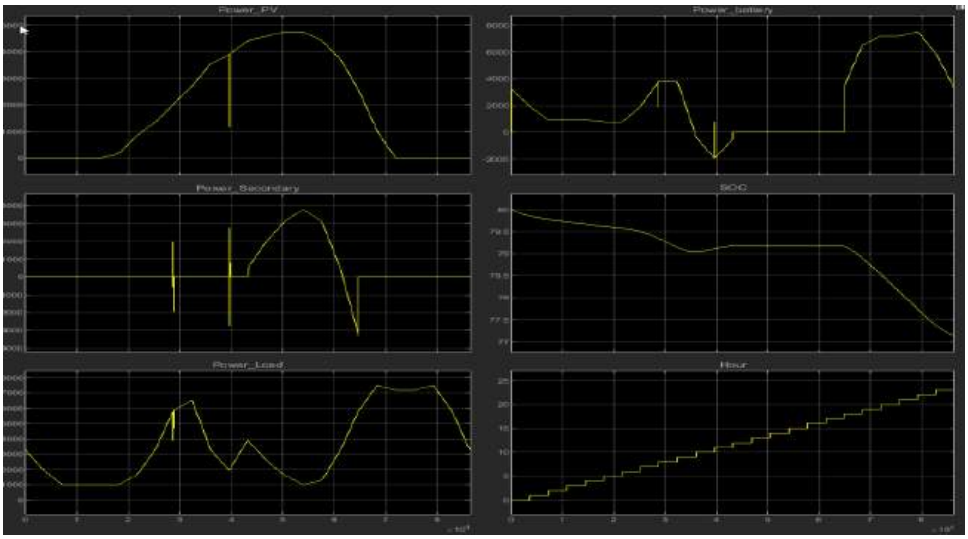


Рисунок 2 – Результати моделювання роботи мережі

Висновок. Запропонована модель підтвердила ефективність прогнозованого керування для балансування потужності в гібридній мікромережі. Застосування СЕС та накопичувачів дозволяє зменшити залежність від основної енергосистеми й підвищити надійність електропостачання локальних споживачів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Khatun, E., Hossain, M., Ali, M., & Halim, M. (2023). A Review on Microgrids for Remote Areas Electrification-Technical and Economical Perspective. International Journal of Robotics and Control Systems, 3(4), 627-642. https://doi.org/10.31763/ijrcs.v3i4.985

2. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. Energies. 2023. 16(6). 2638. https://doi.org/10.3390/en16062638

3. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical Modelling of Cogeneration Photoelectric Module Parameters for Hybrid Solar Charging Power Stations of Electric Vehicles. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397

УДК 621.311.243:620.91:330.43

ДИНАМІКА БУДІВНИЦТВА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ І УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ У СВІТІ ТА УКРАЇНІ

Павлов А. О., інженер, e-mail: andriy_pavlov@me.com
СК «Монолит»
Мороз О. М., д.т.н., проф., e-mail: moroz.an@ukr.net
Мірошник О. О., д.т.н., проф., e-mail: omiroshnyk@ukr.net
Тоберт М. Ю., асп., e-mail: tobert.mikhail@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В останні роки у світі спостерігається стрімкий розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), особливо сонячної енергетики, що пов'язано з проблемою глобального потепління та забрудненням оточуючого середовища викидами CO_2 при спалюванні викопних видів палива, а також різким здешевленням фотоелектричних технологій, що зробило їх економічно конкурентоспроможними порівняно з традиційною генерацією. За даними IRENA (International Renewable Energy Agency), у 2024 році глобальна потужність відновлюваних джерел електроенергії зросла на 585 ГВт (+15,1%), внаслідок чого загальна установлена потужність склала приблизно 4 448 ГВт. При цьому близько 452 ГВт з приросту потужностей припадає на сонячну енергетику (~ 32,2 % зростання) [1].

Метою дослідження є аналіз світових і національних тенденцій розвитку сонячної енергетики та установок зберігання енергії (УЗЕ), визначення основних чинників, що впливають на темпи їх будівництва, а також оцінка ролі цих технологій у забезпеченні енергетичної безпеки, гнучкості та стійкості Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України в умовах війни та післявоєнного відновлення.

Основні матеріали досліджень. Стрімке зростання обсягів генерації з ВДЕ призводить до нестабільності виробництва електроенергії, тому актуальними питаннями є згладжування коливань генерації, забезпечення балансу потужності та підвищення надійності енергопостачання, які можливо вирішити за рахунок будівництва систем накопичення енергії (Battery Energy Storage Systems – BESS). Інтенсивне будівництво BESS у світі у 2023–2025 рр. зумовлене поєднанням технологічних, економічних і політичних чинників, які стимулюють інтеграцію ВДЕ та підвищення гнучкості енергетичних систем. Цьому також сприяють такі фактори:

1) Зниження вартості літій-іонних технологій. Протягом останніх п'яти років середня вартість акумуляторних систем зменшилася більш ніж удвічі.

2) Підтримка з боку державних програм та «зелених» ініціатив. Багато країн (Китай, США, Німеччина, Італія) запровадили податкові пільги, гранти або обов'язкові вимоги щодо встановлення систем накопичення енергії разом із ВДЕ-об'єктами.

3) Необхідність підвищення гнучкості та стабільності енергосистем. BESS дозволяють покривати пікові навантаження, забезпечувати резерв потужності, підтримувати частоту та напругу у мережі.

4) Розвиток децентралізованої енергетики та «розумних» мереж (Smart Grids). Інтеграція BESS у локальні мікромережі та домогосподарства забезпечує енергетичну автономність, зменшує навантаження на розподільні мережі та дозволяє споживачам брати участь у програмах гнучкого споживання («demand response»).

5) Економічна вигода та ринкові стимули. BESS забезпечують можливість купівлі електроенергії в години низьких тарифів і продажу її під час пікових цін, що підвищує прибутковість проєктів. З'являються нові ринки допоміжних послуг (frequency regulation, capacity markets), де BESS виступають ключовим гравцем.

Дані щодо динаміки будівництва СЕС та BESS у країнах-лідерах наведені в таблиці 1.

Таким чином Китай, США та ЄС разом забезпечили ~ 489 ГВт нових потужностей СЕС у 2024 році, що становить ~ 83,6 % від загального обсягу будівництва СЕС у світі. За даними

Energy-Storage.News / BNEF у 2025 році очікується додавання ~ 92 ГВт (~ 247 ГВт·год батарейних систем, що на ~23 % більше, ніж у 2024 році (~ 70 ГВт) [7]. У першому півріччі 2025 року глобальне встановлення батарей склало ~ 86,7 ГВт·год – зростання на 54 % порівняно з аналогічним періодом 2024 року. [8]. В цілому за весь 2025 рік заплановано будівництво більше 412 ГВт·год ємностей BESS. Лідером серед країн світу у встановленні систем зберігання енергії є Китай, його частка у будівництві складає понад 50 %.

Таблиця 1 – Дані щодо розвитку СЕС та систем накопичення енергії у 2024–2025 рр. по країнах/регіонах

Країна/и	Приріст потужностей СЕС у 2024 році	BESS
Китай	Побудовано ~ 278 ГВт (~ 61-64% світового приросту PV) [2]	У першій половині 2025 року >50% BESS у світі [3]
США	Побудовано ~ 38,3 ГВт [2]	Встановили ~ 10,4 ГВт·год у 2024 р. [4]
ЄС	Побудовано ~ 172,7 ГВт [5]	Очікуване будівництво BESS за середнім сценарієм у 2025-2029 рр. ~ 29,7 ГВт·год [6]

Електроенергетичний сектор України з початку повномасштабного вторгнення рф до червня 2025 року втратив біля 42% генеруючих потужностей енергосистеми внаслідок значних руйнувань та окупації території [9], на якій були розміщені генеруючі потужності. Значних руйнувань зазнала і «зелена» генерація, було зруйновано та окуповано 3,9 тисяч МВт потужностей вітрових та сонячних електростанцій. Для підвищення надійності електрозабезпечення та зменшення витрат на оплату електричної енергії в Україні у 2024 році інтенсивно відбувалось будівництво СЕС, так бізнес побудував 587,22 МВт потужностей для власного споживання та 10,02 МВт, які під'єднані до мережі [9]. Також інтенсивно будувалися СЕС домогосподарств, було побудовано 28,58 МВт потужностей.

За результатами прогнозування сценаріїв розвитку України, який проведений Українським інститутом майбутнього в рамках «Прогнозу економіки України 2025» [9], було визначено, що при оптимістичному сценарії (закінчення активних бойових дій та суттєвій допомозі країн заходу) споживання електричної енергії в Україні у 2030 році зросте на 13% до 182 ТВт·год на рік. При песимістичному сценарію (продовження активних бойових дій та зменшеній фінансовій допомозі – до 25–30 млрд доларів США) споживання електричної енергії в Україні у 2030 році буде біля 130 ТВт·год на рік. Але за кожним із сценаріїв розвитку України буде відбуватися збільшення долі «зеленої» генерації і у загальному енергетичному міксі вона буде становити 12–15%.

Сонячна енергетика в Україні стрімко розвивається через нові закони, державну підтримку, інвестиції бізнесу та через критично важливу потребу в енергонезалежності підприємств і домогосподарств під час війни. Позитивний вплив на розвиток сонячної енергетики в Україні мало скасування ПДВ та мит на імпорт сонячних панелей з 1 липня 2023 року, що суттєво зменшило капітальні витрати на будівництво СЕС. Станом на кінець 2025 року триває дія законів № 3853-IX та № 3854-IX від 16.07.2024, які звільнили від митних платежів (мита та ПДВ) імпорт енергетичного обладнання, включно з сонячними панелями, до 1 січня 2026 року [10]. Важливий вплив на галуз сонячної енергетики також мають важливі законодавчі зміни, які стимулюють ринок електричної енергії за рахунок впровадження статусу активного споживача [11] та прийняття закону про «зелену» трансформацію [12]. Це дозволяє підприємствам не лише використовувати електроенергію, згенеровану СЕС, для власних потреб, а й продавати її надлишки в мережу.

В умовах масованих атак рф на енергетичну систему України роль установок зберігання енергії (УЗЕ) є надзвичайно високою. Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року [13] визначає потребу в УЗЕ, і стимулює розвиток таких установок на законодавчому рівні. Не зважаючи на військові ризики приватний бізнес будує УЗЕ, так ДТЕК побудував найбільший комплекс УЗЕ в Україні потужністю 200 МВт та ємністю

400 МВт·год [14] і біля 300 МВт УЗЕ перебувають у стадії будівництва [15]. Для надійної роботи ОЕС України повинна мати ~656 МВт УЗЕ, що потребує ~$502 млн приватних інвестицій [16]. За прогнозом «Innovative Grid Technologies for Ukraine Next Winter …» [17], Україна потребуватиме ~800 МВт УЗЕ для підтримки гнучкості системи.

Висновок. Сонячна енергетика в поєднанні з системами зберігання енергії формує нову структуру української енергетики, сприяє децентралізації та енергетичній незалежності домо-господарств і підприємств, знижує навантаження на мережі та створює основу для інтеграції України до європейського енергетичного простору. Таким чином, розвиток СЕС і УЗЕ є клю-човим напрямом модернізації енергетичного сектору України, що забезпечує підвищення його надійності, гнучкості та відповідності сучасним світовим тенденціям енергетичного переходу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Renewable energy statistics 2025. URL: https://www.irena.org/Publications/2025/Jul/Renewable-energy-statistics-2025.
2. Renewable Capacity Highlights. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Highlights_2025.pdf.
3. BloombergNEF. Global Energy Storage Boom: Three Things to Know. https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-energy-storage-boom-three-things-to-know/ .
4. GLOBAL STATUS REPORT 2025. Global Overview. https://www.ren21.net/gsr-2025/global_overview/.
5. IRENA. RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2025. https://www.rinnovabili.it/wp-content/uploads/2025/07/IRENA-RENEWABLE-CAPACITY-STATISTICS-2025.pdf.
6. European Market Outlook for Battery Storage 2025-2029. https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/european-market-outlook-for-battery-storage-2025-2029/detail.
7. Global energy storage deployments on track for record year in 2025. https://www.energy-storage.news/global-energy-storage-deployments-on-track-for-record-year-in-2025-bnef-says/.
8. Worldwide battery storage installations up 54% in first half of 2025. https://tinyurl.com/48kftamv.
9. Станіслав Ігнатьєв. Яким буде український електроенергетичний мікс: прогноз до 2030 року. Баланс енергетики України. №5(85), травень 2025. С. 9-21. https://drive.google.com/file/d/1b33OhYsDNUIF8J10zdq8XMAiiL1CO1rL/view.
10. Продовження безмитного імпорту обладнання для СЕС та СНЕ з 1 січня 2026 р. під питанням – голова енергокомітету Ради. https://tinyurl.com/2ex56cj2.
11. Про затвердження Порядку продажу та обліку електричної енергії, виробленої активними споживачами, та розрахунків за неї. Документ v2651874-23, чинний, поточна редакція – Редакція від 26.06.2025, підстава – v0953874-25. https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2651874-23#Text.
12. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України. Документ 3220-IX, чинний, поточна редакція – Редакція від 30.06.2024, підстава – 3764-IX. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text.
13. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. Документ 761-2024-р, чинний, поточна редакція – Прийняття від 13.08.2024. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12.
14. ДТЕК разом із американською Fluence побудував найбільший комплекс установок зберігання енергії в Україні на 200 МВт. https://tinyurl.com/4tcaj69n.
15. Ukraine: Ukraine’s Energy Storage Market: A New Frontier for Investment https://tinyurl.com/55smrj6u.
16. Розвиток сектору установок зберігання енергії в Україні. https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/bess-report-ukraine-v3-18.08.2025.pdf.
17. Innovative Grid Technologies for Ukraine. Next Winter and Beyond: Four Challenges - Four Actions. https://greendealukraina.org/assets/images/reports/gdu-technologies-for-ua-grid.pdf.

УДК 621.311.243:330.43

ОПТИМІЗАЦІЙНА ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДОМОГОСПОДАРСТВА

Павлов А. О., інженер, e-mail: andriy_pavlov@me.com
СК «Монолит»
Пазій В. Г., асп., e-mail: pazziy@ukr.net
Мороз О. М., д.т.н., проф., e-mail: moroz.an@ukr.net
Мірошник О. О., д.т.н., проф., e-mail: omiroshnyk@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В умовах постійних атак російської федерації (рф) на енергетичні об'єкти України [1, 2], що в свою чергу призводить до постійних перебоїв у електрозабезпеченні, а також зростання тарифів на електроенергію, все більша кількість домогосподарств в Україні інвестують у гібридні та автономні СЕС як надійне джерело енергонезалежності. На кінець 2024 року кількість СЕС домогосподарств (СЕСд) становила біля 50 тисяч, загальною встановленою потужністю 1,5 ГВт [3]. Для підвищення енергетичної стійкості та автономності домогосподарств в умовах дефіциту потужностей та нестабільного електропостачання, гібридні СЕСд (з інтегрованими системами зберігання енергії) стають ключовим елементом децентралізації енергетики України. При цьому постійне зростання тарифів на електроенергію та зміна регуляторного поля (перехід від «зеленого» тарифу до механізмів самоспоживання та Net Billing [4]) вимагають точних економічних інструментів для обґрунтування інвестицій. Розробка економічної моделі СЕСд дозволяє знайти оптимальний баланс між інвестиційними витратами на обладнання (СЕС + АКБ), операційними витратами (враховуючи деградацію батарей) та прибутком від торгівлі електроенергією за «зеленим» тарифом, що є критичним для забезпечення окупності та фінансової ефективності будівництва СЕСд.

Метою дослідження є розробка оптимізаційної економічної моделі гібридної СЕСд, яка забезпечує мінімізацію сукупних витрат на електроенергію за умов використання «зеленого» тарифу, двоставкових роздрібних тарифів та врахування деградації АКБ.

Основні матеріали досліджень. Гібридна СЕСд – це інтегрована енергетична система, що поєднує фотоелектричні модулі (ФЕМ), систему накопичення енергії та підключена до розподільної електричної мережі, забезпечуючи взаємодію між джерелами генерації, споживачами та мережею в реальному часі. Така система дозволяє оптимізувати споживання та продаж електроенергії, підвищуючи економічну ефективність і рівень енергетичної незалежності домогосподарства. Використання алгоритмів оптимізації режимів роботи гібридної СЕСд з урахуванням добових профілів генерації, споживання та тарифів на електроенергію сприяє раціональному розподілу енергетичних потоків, зниженню витрат і максимізації прибутків за умови дії «зеленого» тарифу.

Економічна модель гібридної СЕСд будується на основі енергетичного балансу гібридної СЕСд, який враховує:

– виробіток електроенергії СЕСд в залежності від потужності ФЕМ та інвертора, інсоляції, кута нахилу та азимуту модулів;

– споживання електроенергії домогосподарством за добовим профілем;

– заряд/розряд акумуляторних батарей (АКБ);

– потоки енергії між СЕС, АКБ, внутрішнім навантаженням і мережею;

– дію «зеленого» тарифу та диференційованих роздрібних тарифів.

Баланс електроенергії домогосподарства у годину t визначається за формулою:

$$P_t^{PV} + G_t^{imp} + P_t^{dis} = L_t + P_t^{ch} + G_t^{exp},$$

де P_t^{PV} – генерація PV у годину t, кВт·год;

L_t – навантаження (споживання) домогосподарства у годину t, кВт·год;

G_t^{imp} – імпорт енергії з мережі, кВт·год;

G_t^{exp} – експорт енергії у мережу за «зеленим» тарифом, кВт·год;

P_t^{ch} – кількість електроенергії використаної на зарядку батареї, кВт·год;

P_t^{dis} – кількість електроенергії використаної за рахунок розряду батареї, кВт·год.

Таким чином, при надлишковій генерації СЕСд може покривати навантаження, заряджати АКБ або віддавати надлишки електроенергії в мережу, при незначній генерації електроенергія може споживатися із мережі або з АКБ.

При визначенні балансу електроенергії необхідно враховувати технологічні обмеження на роботу АКБ, зокрема обмеження потужності заряду:

$$0 \le P^{ch} \cdot t \le P_{max}^{ch}$$

та потужності розряду

$$0 \le P^{dis} \cdot t \le P_{max}^{dis}$$

Таким чином, ці обмеження гарантують, що АКБ завжди працює в межах своїх фізичних і технічних можливостей (максимальних струмів і потужностей), захищаючи її від перевантаження.

Задачею оптимізаційної моделі є мінімізація чистих витрат домогосподарства (купівля і продаж електроенергії, мінус витрати на деградацію батареї), що еквівалентно максимізації прибутку. Мінімальне значення чистих витрат визначається за формулою [5]:

$$J = \sum_{t=1}^{T}\left(p_t^{\text{buy}} \cdot G_t^{\text{imp}} - p_t^{\text{sell}} \cdot G_t^{\text{exp}}\right) + c^{\text{deg}} \cdot \sum_{t=1}^{T}\left(P_t^{\text{ch}} + P_t^{\text{dis}}\right),$$

де p_t^{buy} – тариф купівлі електроенергії з мережі, грн/кВт·год;

p^{sell} – тариф продажу електроенергії за «зеленим» тарифом, грн/кВт·год;

c_{deg} – вартість деградації батареї, грн/кВт·год.

Термін окупності СЕСд в роках визначався за формулою розрахунку простого періоду окупності:

$$PP = \frac{I_0}{CF_{avg}},$$

де I_0 – початкові інвестиційні витрати на проєкт (вартість обладнання СЕСд, монтаж, приєднання тощо);

CF_{avg} – середній річний чистий грошовий потік (різниця між доходами від продажу електроенергії та експлуатаційними витратами).

Висновок. Запропоновані показники оптимізаційної економічної моделі гібридної СЕСд дозволяють визначати раціональні режими роботи системи з урахуванням змін тарифів, добових профілів споживання і генерації, а також обмежень по потужності та ємності акумуляторних батарей. Використання цієї моделі дає змогу мінімізувати чисті витрати домогосподарства на електроенергію, оптимізувати використання власної генерації та підвищити коефіцієнт самоспоживання. Результати дослідження можуть бути використані для економічного обґрунтування інвестицій у гібридну СЕСд.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Енергетика України втратила понад 9 ГВт потужностей генерації – уряд. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/enerhetyka-ukrainy-vtratyla-ponad-9-hvt-potuzhnostei-heneratsii-uriad.

2. Перехід на графіки погодинних відключень е/е залежатиме від наслідків ударів та часу відновлення об’єктів – глава Міненерго. URL: https://tinyurl.com/muwv74b2.

3. ExPro Consulting. Скільки СЕС приватних домогосподарств встановлено в регіонах? URL: https://expro.com.ua/novini/sklki-privatnih-ses-vstanovleno-v-regonah-.

4. Розпорядження КМ України «Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 — 2026 роках». URL: http://surl.li/fgycnf.

5. Rafał, K., Radziszewska, W., Grabowski, O., Biedka, H., & Verstraete, J. (2023). Energy Cost Minimization with Hybrid Energy Storage System Using Optimization Algorithm. Applied Sciences, 13(1), 518. https://doi.org/10.3390/app13010518.

УДК 663.004.183; 631.172

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Поляк М. І., магістр, e-mail: kolja.poljak@gmail.com
Дудніков С. М., доц., dydnikov@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. За наявності значного власного геліопотенціалу, агропромисловий комплекс (АПК) України поступово нарощує обсяги використання сонячних електростанцій (СЕС) як альтернативного джерела енергії.

Головним стимулом активного впровадження сонячної енергетики тривалий час залишався так званий зелений тариф, який забезпечував підвищену закупівельну ціну на електроенергію, вироблену з відновлюваних джерел.

Використання автономних або гібридних сонячних електростанцій без підключення до загальної енергомережі на підприємствах аграрного сектору досі викликає суперечливі оцінки серед фахівців та громадськості. Основним аргументом скептиків є висока собівартість виробленої електроенергії, що пов'язано зі значними первинними інвестиціями в обладнання [2].

Разом із тим, на тлі нестабільності тарифів, підвищення цін на енергоносії та частих перерв у електропостачанні, інтерес до автономних систем живлення зростає. Тому питання економічної доцільності таких систем набуває стратегічного характеру та потребує подальшого техніко-економічного обґрунтування з урахуванням регіональних особливостей і сучасних технологічних рішень [3].

Мета дослідження – обґрунтування техніко-економічних показників використання сонячних електростанцій

Ціна електроенергії, що постачається від централізованої системи (ЦС), має тенденцію до постійного збільшення за часом. Підвищення тарифів на електроенергію пов'язане з рядом об'єктивних факторів: зростанням цін на паливно-енергетичні ресурси, збільшенням витрат на обслуговування та модернізацію енергетичної інфраструктури, а також інфляційними процесами у національній економіці. Крім того, з урахуванням світових тенденцій декарбонізації енергетики, вартість електроенергії з традиційних джерел надалі буде зростати через введення в дію вуглецевих податків і додаткових екологічних зборів.

На відміну від ціни на електроенергію від ЦС собівартість (С) електроенергії від СЕС постійно змінюється в сторону зменшення, так як постійно будуть збільшуватися обсяги корисно використаної енергії що пояснюється залежністю:

$$C = \frac{З}{W}\ , \qquad (1)$$

де *З* – загальні капітальні та амортизаційні затрати на СЕС, грн;

W – обсяги корисно використаної електроенергії, яка вироблена СЕС, кВт·год.

Крім того, відповідна тенденція пояснюється техніко-економічними особливостями сонячної генерації. По-перше, з розвитком технологій відбувається постійне зростання коефіцієнта корисного використання сонячного випромінювання. Нові типи фотоелектричних модулів мають вищий ККД, менший температурний дрейф та підвищену стійкість до деградації. Відповідно, ефективність експлуатації СЕС зростає, а середня собівартість виробленої електроенергії зменшується.

По-друге, відбувається ефект масштабування: зі збільшенням кількості встановлених потужностей зменшується вартість одиниці обладнання.

За результатом аналізу світових звітів та аналітики IRENA, IEA, BloombergNEF, "Global PV Market Outlook" встановлено, що середня вартість виробництва електроенергії з

СЕС (LCOE) знизилася більш ніж на 89 % з 2010 року і має тенденцію до подальшого зменшення; фіксується стабільне зростання тарифів на електроенергію від традиційних джерел унаслідок підвищення вартості палива та вуглецевих зборів; прогнозується зниження вартості сонячних модулів на 3–5 % щороку до 2035 р. За даними звіту Держенергоефективності (2023) зазначено, що вартість встановлення 1 кВт СЕС в Україні знизилася з 1300 USD (2017 р.) до близько 600–700 USD (2023 р.); НКРЕКП подає дані про поступове зростання тарифів на електроенергію для непобутових споживачів, зокрема для АПК. На основі проведених аналітичних досліджень на рисунку 1 наведено прогнозовану динаміку змін собівартості та цін на електроенергію від СЕС та ЦС.

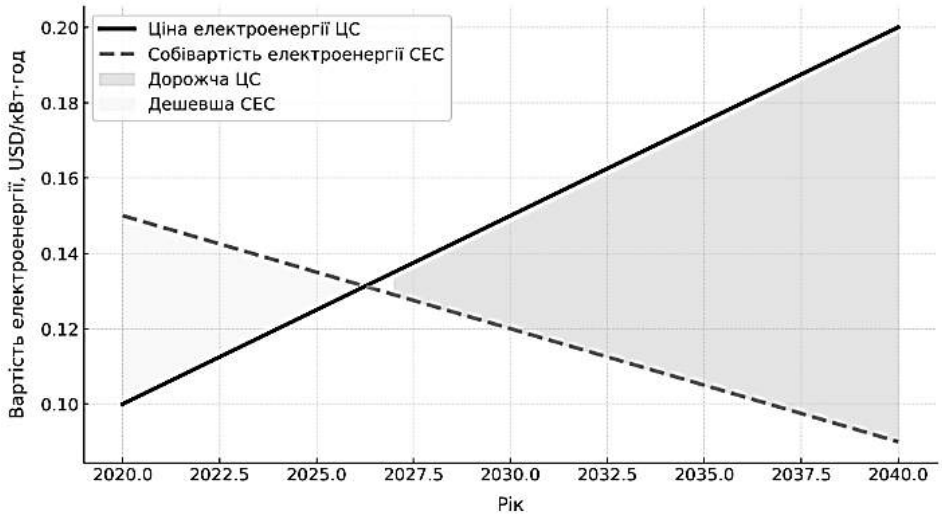


Рисунок 1 – Прогнозне порівняння змін ціни та собівартості електроенергії відповідно ЦС та СЕС

Для спрощеного моделювання прийнято:

- Початкову ціну ЦС (2020 р.) — 0.10 USD/кВт·год із зростанням на 0.005 USD/рік (≈ 5 % щорічно, враховуючи інфляцію й тарифні зміни).
- Початкову собівартість СЕС (2020 р.) — 0.15 USD/кВт·год із поступовим зниженням на 0.003 USD/рік (≈ 2 % річне технологічне вдосконалення).

Такі параметри відповідають усередненим даним міжнародних прогнозів IRENA і IEA для регіонів із середнім рівнем інсоляції (Україна, Центральна Європа).

Для підприємств АПК особливу роль відіграє не лише номінальна вартість енергії, а й стабільність її ціни від СЕС в довгостроковій перспективі. Це дозволяє підприємствам прогнозувати свої енергетичні витрати з високою точністю і забезпечувати фінансову стабільність навіть у періоди енергетичної кризи або тарифних коливань.

Висновок. ціна електроенергії централізованої системи має стабільну, але зростаючу динаміку, тоді як собівартість енергії від сонячних електростанцій поступово знижується, що у перспективі створює умови, за яких локальна генерація СЕС стає не лише екологічно доцільною, але й економічно конкурентоспроможною порівняно з централізованими джерелами електропостачання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hussienat L. H. Phased Modeling Of An Autonomous Solar Power Plant And Its Operation In The Power System [Electronic resource] / L. H. Hussienat, A. Sereda, M. Syvenko, V. Bezruchko, S. Dudnikov, S. Halko // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023: Conference Proceedings, Kharkiv, October 2-6, 2023. – Kharkiv, 2023. – DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312834.

2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2023. – Abu Dhabi: IRENA, 2024. – 112 p.

УДК 621.311.243

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

Потапенко М. В., к.т.н., доц., e-mail: m.potapenko19@gmail.com
Рамш В. Ю., к.т.н., доц., e-mail: ramsh_v@ukr.net
Шаршонь В. Л., ст. викл., e-mail: vsharshon@gmail.com
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Актуальність дослідження. Сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямків відновлюваних джерел енергії, що сприяє зниженню викидів парникових газів та енергетичній незалежності. Фотоелектричні модулі, які перетворюють сонячне випромінювання у електричну енергію, є ключовими компонентами сонячних електростанцій [1].

Фотоелектричні елементи сонячних модулів потребують дотримання відповідних умов експлуатації, для того щоб працювати з прийнятною ефективністю і виробляти електричну енергію без значних втрат.

Електричні процеси, що відбуваються в сонячних елементах, як і в будь-якому іншому електронному обладнанні, відповідають законам термодинаміки [2]. Підвищення температури в сонячному елементі викликає зменшення ширини забороненої зони кремнієвого матеріалу, при цьому струм насичення буде збільшуватися, так як для утворення електронно-діркових пар потрібно менше енергії. Однак збільшення струму буде незначним, а зменшення напруги і, відповідно, зменшення вихідної потужності буде більш помітним.

Реальні умови експлуатації далеко не завжди відповідають умовам випробування фотоелектричних модулів перед введенням в експлуатацію, а тому для споживачів постають питання, якою буде реальна генерація модулів та які параметри необхідно врахувати при виборі модулів. У зв'язку з цим визначення енергетичних характеристик сонячних модулів із урахуванням зовнішніх параметрів є актуальним завданням.

Мета дослідження – оцінка енергетичних характеристик фотоелектричних модулів з урахуванням впливу зовнішніх температурних факторів, а також аналіз їх впливу на ефективність генерації електроенергії, деградацію модулів та визначення оптимальних умов експлуатації для забезпечення максимальної продуктивності сонячних установок.

Основні матеріали досліджень. Значний вплив на ефективність роботи фотоелектричних модулів та максимальну вихідну потужність усієї сонячної батареї здійснює температура навколишнього середовища [3]. Чим більше нагрівається сонячна панель, тим менше енергії вона генерує. Крім температури середовища на роботу модуля впливають температурний коефіцієнт потужності і тип установки.

При підвищенні температури на передній поверхні модуля спад напруги стає більшим, ніж збільшення струму. Тому потужність модуля як добуток цих величин зменшується і модуль працює з меншою ефективністю. Температурний коефіцієнт потужності показує, на скільки відсотків знизиться потужність пристрою при підвищенні температури на кожен градус відносно її стандартного значення 25 °C.

Залежність вихідної потужності сонячного елемента P від температури визначається за виразом:

$$P = P_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (1)$$

де P_0 – потужність фотоелемента при стандартній температурі 25 °C, Вт; β – температурний коефіцієнт потужності, %/°C; ΔT – підвищення температури фотоелемента, °C.

В залежності від типу матеріалів, що застосовуються, температурний коефіцієнт потужності має значення від 0,2 %/°C (для аморфних тонкоплівкових елементів) до 0,5 %/°C (для полікристалічних). Чим ближче температурний коефіцієнт до нуля, тим краще модуль буде працювати при підвищених температурах.

Температурний коефіцієнт потужності залежить від якості фотоелектричних перетворювачів. Якість перетворювачів також визначає ступінь деградації панелей. Відомо, що монокристалічні панелі деградують швидше, ніж полікристалічні, і за рік експлуатації їх потужність знижується на 3% порівняно з 2% у полікристалічних [4]. Це пов'язано з різницею в кристалічній структурі і технологіях виготовлення, що впливає на стійкість матеріалу до термічних та механічних впливів. Тому важливо дотримуватись умов експлуатації сонячних енергетичних установок, захищаючи їх від перегріву.

Тип сонячного модуля та його якість є ключовими факторами, що визначають температуру нагріву поверхні фотоелектричного елемента під час експлуатації. Модулі високої якості, виготовлені з використанням передових технологій та матеріалів, здатні ефективно працювати в широкому діапазоні температур, зазвичай від –40 °C до +90 °C.

Висока якість сонячних модулів передбачає не лише підвищену термостійкість, але й покращену стійкість до механічних навантажень, ультрафіолетового випромінювання та вологості, що запобігає передчасній деградації і забезпечує їх довготривалу експлуатацію.

Термін експлуатації сонячних модулів багато в чому залежить від правильного вибору місця їх встановлення. Якщо модулі встановлені на даху, на них діють набагато вищі температури, ніж температура навколишнього середовища. Крім того, якщо це буде покрівля будівлі темного кольору, при її швидкому нагріванні від сонця вона починає перевипромінювати тепло на сонячні панелі. Матеріал даху також впливає на температурний баланс модулів, що встановлені на ньому. Зокрема, такі матеріали, як шифер, металочерепиця, бітумний дах, нагріваються швидко і довго остигають. Це пояснюється їх високою теплопровідністю та низькою теплоємністю, через що підвищена температура поверхні даху передається на розташовані поруч або безпосередньо на них сонячні модулі.

Фотоелектричні модулі, які закріплені паралельно до даху, практично не пропускають повітряний потік між дахом та панеллю, є найменш ефективними і зазнають найбільшого збільшення температури. Типова установка в стійку допускає зазор понад 150 мм між поверхнею даху та панеллю, що дозволяє повітряному потоку здійснювати охолоджувальний вплив на панель. Такий тип встановлення більш ефективний, ніж закріплення паралельно даху. Проте найкращий варіант – це коли сонячна панель встановлена на стійці в окремій рамі. Кожен із цих типів установки впливає на температуру модуля і, відповідно, на його продуктивність.

Висновок. Отже, робота фотоелектричних модулів в умовах підвищених температур призводить до їх прискореної деградації і негативно впливає на енергетичні характеристики. Для правильного вибору модуля необхідно знати, як зміниться генерація електроенергії в реальних умовах експлуатації.

Вихідна потужність сонячного елемента визначається температурним коефіцієнтом потужності, який залежить від типу застосовуваних матеріалів, їх якості та способу розміщення модулів.

Врахування цих факторів при виборі та розміщенні фотоелектричних модулів дозволяє оптимізувати їх роботу, знизити темпи деградації і підвищити загальну генерацію електроенергії в реальних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с.

2. Дубровська В. В., В.І. Шкляр В. І. Технологія виробництва електричної енергії: підручник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 316 с.

3. Ефективність сонячних панелей – ККД та як підвищити продуктивність.URL: https://www.sig.energy/efektyvnist-sonyachnyh-panelej-kkd-ta-yak-pidvyshhyty-produktyvnist/

4. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 73-82.

УДК 659.1:620.92

СТРАТЕГІЧНА РОЛЬ ЦИФРОВОГО МАРКЕТИНГУ В ПОПУЛЯРИЗАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ (ВДЕ)

Сорокіна Н. Ю., асист., e-mail: mrs40ina@gmail.com
Університет глобальних стратегій «Альтера»

Актуальність дослідження. Цифрова трансформація суттєво змінила ландшафт комерційних взаємодій, і сфера відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) не є винятком. Актуальність цифрового маркетингу для цього сектору зумовлена двома ключовими факторами: макроекономічним імперативом енергетичного переходу та внутрішньогалузевою проблемою інформаційної асиметрії.

Глобальний перехід до GreenTech вимагає не просто заміни однієї технології на іншу, а кардинальної зміни в інвестиційному та споживчому мисленні. Проблема полягає у високій складності самих рішень (наприклад, сонячні електростанції, теплові насоси, інтегровані системи управління енергією). Споживачі, чи то приватні домогосподарства, чи промислові підприємства, часто відчувають інформаційну перевантаженість. Дослідження показують, що при пошуку інформації про складні технологічні продукти, як-от теплові насоси, користувачі можуть бути «перевантажені відсутністю зрозумілої інформації в Інтернеті». Це призводить до паралічу прийняття рішень і гальмує впровадження ВДЕ, попри їхню очевидну довгострокову економічну вигоду.

Вирішенням цієї проблеми є когнітивна оптимізація. Цифровий маркетинг повинен відмовитися від загальних рекламних меседжів на користь освітнього, спрощеного контенту. Компанія, яка публікує «чіткий, спрощений посібник», одразу виділяється. Це створює довіру ще до того, як клієнт висловить намір здійснити покупку, що є критично важливим для складних та високоінвестиційних товарів.

У контексті України, де енергетичний сектор проходить період військових викликів та подальшого післявоєнного відновлення, роль цифрового маркетингу набуває стратегічного значення, виходячи за рамки звичайних продажів. Розвиток ВДЕ в електроенергетичному секторі стикається з низкою значних бар'єрів. Для збереження інтересу інвесторів у період високої нестабільності необхідна максимальна прозорість та докази життєздатності проєктів.

Традиційні маркетингові стратегії часто фокусуються на підвищенні впізнаваності бренду. Однак у сфері ВДЕ, де інвестиційні цикли довгі, а вартість рішень висока, така метрика є недостатньою. Стратегія цифрового маркетингу повинна бути розроблена таким чином, щоб «призвести до їхнього збільшення», тобто до прямого продажу або генерації висококваліфікованих лідів, придатних для подальшого комерційного супроводу.

Мета дослідження. Ринок відновлюваної енергетики є багаторівневим, тому єдине маркетингове повідомлення не може бути ефективним. Необхідна чітка сегментація аудиторії: для B2C важлива фінансова окупність і простота рішень; для B2B – зниження операційних витрат і відповідність ESG-стандартам; для B2G та інвесторів – аналітична прозорість, оцінка ризиків і довгострокова стабільність проєктів. Відповідно, цифрові комунікації мають різну форму – від інтерактивних калькуляторів і контенту для споживачів до white papers та звітів для інвесторів.

Ключові цілі цифрового маркетингу у GreenTech виходять за межі класичної воронки продажів. Головними є генерація кваліфікованих лідів, формування лідерства думок через експертний контент і мобілізація партнерської екосистеми через навчальні платформи. Такі підходи дозволяють підвищити довіру, пришвидшити процес прийняття рішень і забезпечити вимірюваний результат – збільшення конверсії, формування лояльних партнерів та ефективний ROI.

Основні матеріали досліджень. Актуальність цифрового маркетингу в секторі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) визначається необхідністю подолання інформаційної асиметрії. Складність технологічних рішень, таких як сонячні електростанції або теплові

насоси, призводить до того, що споживачі часто відчувають «перевантаженість відсутністю зрозумілої інформації в Інтернеті».

Ключове завдання цифрової стратегії – відмовитися від загальних рекламних меседжів і стати авторитетним джерелом спрощення. Компанія, яка публікує «чіткий, спрощений посібник», одразу виділяється і створює довіру. Стратегія повинна мати чітку орієнтацію на прямий продаж (Performance), а не лише на впізнаваність бренду. Для цього критично важливо забезпечити верифікацію довіри, розміщуючи на вебсайті реальні відгуки, сертифікати та професійні кваліфікації.

Успіх у популяризації ВДЕ вимагає чіткої сегментації аудиторії та використання прогностичної аналітики:

- Сегментація та Кастомізація: Через різноманітність ринку, єдиний меседж неефективний. Повідомлення мають бути адаптовані: B2C фокусується на окупності, B2B – на зниженні операційних витрат та ESG-факторах, а інвестори – на довгостроковій стабільності, що вимагає використання професійних мереж, як-от LinkedIn.
- Стратегічні Цілі:
  - Генерація Кваліфікованих Лідів: Фокус на «підігрітих» запитах, придатних для прямого продажу.
  - Встановлення Лідерства Думок (Thought Leadership): Надання авторитетної, зрозумілої інформації.
  - Мобілізація Екосистеми: Залучення та навчання партнерів (наприклад, через Академії) для забезпечення якості та масштабу.
- Аналітична Озброєність: Цифровий маркетинг у ВДЕ вимагає використання великих масивів даних для моделювання можливих шляхів реалізації рішень. Це дозволяє оптимізувати маркетингові бюджети та забезпечити ефективний ROI.

Ефективна стратегія поєднує контент, інтерактивність та інфраструктуру. Використовуються п'ять ключових цифрових вимірів, з пріоритетом на SEO, контент-маркетинг та професійні соціальні мережі. У сфері, де ключовим є ROI, інтерактивний контент (калькулятори окупності, конфігуратори) стає найпотужнішим інструментом. Він перетворює складність на залученість, надає персоналізовану цінність, і, якщо він якісний, «запускає сарафанне радіо та просуває сам себе». Вебсайт має бути стратегічним активом. Впровадження глобальних елементів контенту забезпечує легкість оновлення та масштабованість для компаній, що працюють на кількох ринках.

Нижче наведено матрицю, що пов'язує типи контенту з етапами воронки продажів ВДЕ:

Етап Воронки	**Тип Контенту**	**Формат**	**Ключова Ціль**
Усвідомлення/ Довіра	Освітній, Авторитетний	Блоги, YouTube-пояснення, Спрощені гайди	Подолання інформаційної перевантаженості
Розгляд/ Залуження	Інтерактивний, Дослідницький	Калькулятори ROI, Вікторини, Онлайн-оцінка об'єкта	Персоналізація та залучення
Рішення/ Конверсія	Верифікаційний, Доказовий	Кейс-стаді, Відгуки, Сертифікації, Білі Книги (White Papers)	Побудова довіри перед фінальною покупкою/інвестицією
Екосистема/ Утримання	Спеціалізований, B2B	Академії, навчальні курси, LinkedIn-пости	Забезпечення якості та масштабування партнерської мережі

Багато українських компанії демонструють екосистемний підхід. Використовує Відеомаркетинг для залучення власників бізнесу, зацікавлених у промислових СЕС, та

освітні платформи для підготовки спеціалістів у сфері сонячної енергетики. Це вирішує проблему дефіциту кваліфікованих кадрів та посилює авторитет бренду.

Висновок. Проведене дослідження виявляє чотири ключові фактори, які визначають успіх цифрового маркетингу у популяризації відновлюваних джерел енергії, трансформуючи маркетингові витрати з операційних у стратегічні інвестиції:

1. Аналітична орієнтація на продажі: Успішна стратегія фокусується на моделі прямого продажу, підкріпленої здатністю аналізувати великі масиви даних та моделювати можливі шляхи реалізації рішень. Це забезпечує вимірний ROI.
2. Принцип довіри та авторитету: Інвестиції мають бути спрямовані на створення високоякісного, спрощеного освітнього контенту для подолання інформаційної перевантаженості. Публічна демонстрація сертифікацій та знань є обов'язковою для побудови довіри.
3. Інтерактивна залученість: Використання динамічного контенту, такого як калькулятори окупності, є ключовим механізмом для прискорення воронки продажів. Якісний інтерактив "запускає сарафанне радіо" і генерацію високоякісних лідів.
4. Екосистемна підтримка: Цифрові платформи (освітні академії, LinkedIn-присутність) використовуються не лише для залучення клієнтів, а й для розвитку та забезпечення якості партнерської мережі.

У контексті відновлення енергосистеми України, популяризація ВДЕ за допомогою цифрових інструментів є критичним елементом стратегії децентралізації та підвищення стійкості. Цифрові платформи є ідеальним середовищем для масового та швидкого поширення інформації про малі та середні проєкти, що відповідає курсу на створення розподіленої генерації.

Цифрові канали слугують інструментом для адвокації та підтримки інтересу міжнародних інвесторів. Регулярна публікація прозорих звітів, рекомендацій та аналізу бар'єрів через професійні цифрові канали є необхідною умовою для підтримки довіри та залучення міжнародного капіталу до сектору ВДЕ, що є життєво необхідним для енергетичного майбутнього країни.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лаврук О. С. Цифровий маркетинг в дії «Digital Marketing In Action» [електронне видання]: конспект лекцій з навчальної дисципліни для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 073 Менеджмент. Кам'янець-Подільський: К-ПНУ, 2022. 110 с.
2. Окландер М. А., Романенко О. О. Специфічні відмінності цифрового маркетингу від Інтернет-маркетингу. Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. 2015 (12). С. 362-371.
3. JL Creative LTD. How digital marketing can help renewable energy adoption [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://jlcreativeltd.com/blog/how-digital-marketing-can-help-renewable-energy-adoption (дата звернення: 09 жовтня 2025 р.).
4. Всеукраїнська агенція інвестицій та сталого розвитку. Огляд розвитку ВДЕ в електроенергетиці: бар’єри та загальні рекомендації [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://sdia.org.ua/zvit-ohliad-rozvytku-vde-v-elektroenerhetytsi-bar-iery-ta-zahalni-rekomendatsii-dostupnyi-anhliiskoiu-movoiu/ (дата звернення: 17 жовтня 2025 р.)
5. WEZOM. Інтерактивний контент у маркетингу: способи залучення та утримання клієнтів [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://wezom.com.ua/ua/blog/interaktivnyj-kontent-v-marketinge (дата звернення: 23 жовтня 2025 р.).
6. logotio.agency. Online-Marketing for Renewable Energy | Case Study [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://logotio.com/renewable-energy-online-marketing-sales-case-study/ (дата звернення: 27 жовтня 2025 р.).

УДК 621.311.243

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВОК ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА АЛГОРИТМІВ ЇХ КЕРУВАННЯ ПРИ СПІЛЬНІЙ РОБОТІ ІЗ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

Сотнік О. В., асп., e-mail: sidi.leha@gmail.com
Мороз О. М., д.т.н., проф., e-mail: moroz.an@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. За даними International Energy Agency (IEA) [1] (2024), понад 80 % нових генеруючих потужностей у світі становлять відновлювані джерела енергії (ВДЕ), з яких близько 45 % – сонячні електростанції (СЕС). Проте зростання частки СЕС супроводжується проблемами: нерівномірністю генерації, коливаннями напруги, перевантаженням мереж та дефіцитом резервних потужностей [2].

Установки зберігання енергії (УЗЕ) або Energy Storage Systems (ESS) забезпечують накопичення надлишкової електроенергії (ЕЕ) в періоди низького споживання та її віддачу в години пікових навантажень, підвищуючи стабільність і надійність локальних мереж та стали невід'ємним елементом сучасних енергосистем, що використовують сонячну енергію [3]. За оцінками International Renewable Energy Agency (IRENA) (2024), світові ємності УЗЕ перевищили 200 ГВт·год і зростають на 25–30 % щороку [4].

Незважаючи на значний науково-технічний прогрес, сучасні підходи до інтеграції УЗЕ у складі СЕС мають низку істотних обмежень. Насамперед, економічна складова залишається одним із ключових бар'єрів: висока вартість акумуляторних систем (особливо літій-іонних (Li-ion) та натрій-сірчаних (Na-S)) істотно збільшує капітальні витрати на будівництво гібридних СЕС. За оцінками Bloomberg NEF (2023), частка накопичувачів у загальній вартості проекту сягає 30–40 %, що ускладнює їх окупність без державних стимулів [5].

Другим важливим чинником є недостатня енергоємність та обмежена тривалість циклу зберігання окремих типів акумуляторів. Технології на основі Li-ion і літій-залізо-фосфату (LFP) демонструють високу ефективність, проте не забезпечують довготривалого зберігання, необхідного для добового чи сезонного балансування. Натомість системи типу NaS або ванадієво-редоксні проточні батареї (VRFB) відзначаються вищою стабільністю, але потребують значних інвестицій та спеціальних умов експлуатації [6].

Технічні обмеження пов'язані з рядом проблем, таких як гнучкість масштабування систем, недостатність інтеграції між компонентами (інверторами, контролерами, системами моніторингу) та відсутність єдиних комунікаційних стандартів. Це призводить до труднощів у синхронізації режимів роботи генерації, накопичення та споживання енергії, особливо у децентралізованих мережах [7].

Окремої уваги потребує проблема деградації акумуляторів. Через термічні та електрохімічні процеси ефективна ємність батарей знижується на 15–25 % протягом перших п'яти років експлуатації, що вимагає заміни елементів і підвищує експлуатаційні витрати. У більшості моделей управління не враховує динаміки старіння, що знижує точність прогнозування доступної енергії.

Важливим є також недосконаліть алгоритмів прогнозування та керування. Більшість комерційних систем працює за принципом реактивного управління, тобто реагує на зміну режимів постфактум, замість того щоб прогнозувати та запобігати небажаним коливанням. Відсутність комплексних моделей, які враховують погодні умови, змінність навантаження та ринкові коливання цін, призводить до нераціонального використання ресурсів [5–7].

Крім того, актуальною залишається відсутність уніфікованих міжнародних стандартів для побудови гібридних систем «СЕС + УЗЕ». Різні виробники застосовують власні протоколи обміну даними, що ускладнює інтеграцію обладнання в єдину систему управління. Це особливо відчутно в умовах України, де експлуатуються установки різних брендів і поколінь.

У сукупності дані чинники призводять до зниження ефективності використання відновлюваної генерації, збільшення втрат електроенергії та зменшення терміну служби

обладнання. Тому нагальною є потреба у нових інженерно-наукових рішеннях, спрямованих на підвищення технічної, економічної та експлуатаційної ефективності УЗЕ у складі СЕС [5–7].

Мета дослідження – дослідження характеристик установок зберігання енергії та їх алгоритмів керування для підвищення їх ефективності використання спільно із сонячними електростанціями.

Основні матеріали досліджень. Сучасні системи УЗЕ можна класифікувати за принципом дії, типом носія енергії, масштабом та призначенням. Найбільш перспективними для складу СЕС є акумуляторні системи (Li-ion, LFP, NaS, VRFB), суперконденсаторні модулі, а також гібридні схеми з поєднанням декількох типів накопичувачів.

Відповідно до сучасних підходів [1–3], установки зберігання енергії можна поділити на кілька основних груп:

1. Акумуляторні системи – базуються на електрохімічному перетворенні енергії. Найпоширеніші технології: Li-ion – найвища енергетична щільність (до 250 Вт·год/кг), швидке реагування, але обмежений термін служби (2000–4000 циклів) і висока вартість; LFP – мають нижчу енергетичну щільність, але більшу безпечність, стабільність і довговічність (до 7000 циклів); Na-S – придатні для середньо- та довготривалого зберігання, мають високу енергоємність, але потребують температури 300–350 °C для роботи; VRFB – характеризуються тривалим терміном служби (до 20 років) і практично необмеженою кількістю циклів, проте мають високу вартість і низьку енергетичну щільність.

2. Суперконденсаторні системи (SCESS) – забезпечують миттєву віддачу енергії, ефективні для компенсації короткочасних коливань напруги або стабілізації частоти в локальних мережах. Використовуються як допоміжний елемент у поєднанні з акумуляторними установками.

3. Гібридні системи (Hybrid ESS) – поєднують кілька типів накопичувачів (наприклад, LFP + суперконденсатор), що дозволяє забезпечити як довготривале зберігання, так і компенсацію швидкоплинних змін навантаження.

За результатами аналітичних досліджень IRENA (2024) [4] і Fraunhofer ISE (2023) [7], ефективність роботи УЗЕ визначається трьома ключовими показниками: енергетична щільність (Вт·год/кг); коефіцієнт корисної дії (ККД); кількість циклів заряд-розряд. Технічні характеристики та порівняння ефективності роботи УЗЕ наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики та порівняння ефективності роботи УЗЕ

Тип УЗЕ	Енергетична щільність, Вт·год/кг	ККД, %	Кількість циклів	Термін служби, років	Призначення
Li-ion	150-250	90-95	3000-5000	8-10	коротко- та середньо-строкове накопичення
LFP	100-160	90-95	5000-7000	10-15	добове балансування, висока безпека
Na-S	150-240	85-90	4500-5000	10-15	середньо- та довготривале зберігання
VRFB	20-35	70-85	>10000	15-20	добове/сезонне балансу-вання, промислові системи
SCESS	5-10	95-98	>100000	10	короткі пікові навантаження

Дані таблиці 1 показують, що для СЕС малої та середньої потужності (до 1 МВт) найбільш доцільним є використання LFP або гібридних систем (LFP + SCESS), які забезпечують оптимальне співвідношення між безпечністю, ефективністю і вартістю. Для промислових об’єктів та мікромереж перспективними є NaS та VRFB, здатні зберігати енергію протягом багатьох годин і забезпечувати роботу під час відключень або аварій у мережі.

Аналіз досліджень [4–7] свідчить, що ефективність гібридних систем «СЕС + УЗЕ» визначається не лише технічними параметрами акумуляторів, але й алгоритмами керування

енергопотоками. У більшості комерційних рішень застосовується реактивний режим управління, який реагує на зміни генерації вже після їх настання. Такий підхід призводить до перевантаження інверторів, нераціонального використання акумуляторів та зниження ККД.

У сучасних наукових роботах пропонується перехід до інтелектуального керування (Adaptive Energy Management Systems, AEMS), яке використовує прогнозування сонячної інсоляції, моделі поведінки навантаження та ринкові дані. Застосування таких систем дозволяє підвищити ефективність використання акумуляторів на 20–30 %, а тривалість їх служби – на 15–20 %. Крім того, у складі локальних енергосистем перспективним напрямом є застосування гнучких систем передачі змінного струму (FACTS-пристроїв: STATCOM, SVC), які дозволяють регулювати реактивну потужність і підтримувати стабільну напругу в мережі при змінному навантаженні.

Поєднання УЗЕ з FACTS забезпечує комплексне вирішення проблем балансування енергії й напруги. Для кількісного аналізу режимів роботи локальних енергосистем доцільно використовувати моделювання у середовищах MATLAB/Simulink, HOMER, PVsyst, OpenDSS тощо. Це дозволяє досліджувати: вплив розміру й типу УЗЕ на режим роботи СЕС; ефективність стратегій керування зарядом і розрядом; чутливість системи до зміни метеорологічних даних; економічну окупність різних конфігурацій. Особливо актуальним для умов України є створення національної бази даних кліматичних та електричних параметрів, що дозволить підвищити точність моделювання та адаптувати алгоритми до реальних умов експлуатації в регіонах із різним рівнем інсоляції.

Таким чином, наявність таких інструментів як моделі оптимального вибору типу та потужності УЗЕ для локальних СЕС; алгоритми прогнозного керування режимами заряд-розряд; цифрові двійники локальної енергосистеми із СЕС та УЗЕ для оцінки енергоефективності; оцінка економічних показників окупності залежно від типу накопичувача та режимів експлуатації, забезпечать оптимальну роботу СЕС із УЗЕ.

Висновок. Інтеграція УЗЕ у складі СЕС є не лише технічним завданням, а й стратегічним напрямом розвитку енергетичної незалежності України. Впровадження інтелектуальних систем керування, гібридних технологій зберігання та оптимізаційних моделей дозволить забезпечити стабільність енергопостачання, скоротити втрати та підвищити ефективність використання ВДЕ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023 [Електронний ресурс]. – Paris: IEA, 2023. – 432 p. URL: https://iea.org/reports/world-energy-outlook-2023 (дата звернення: 10.10.2025).

2. SolarPower Europe. EU Market Outlook for Solar Power 2023–2027 [Електронний ресурс]. – Brussels: SolarPower Europe, 2023. – 112 p. URL: https://solarpowereurope.org/eu-market-outlook (дата звернення: 10.10.2025).

3. Guerrero J. M., Vasquez J. C. Advanced control architectures for intelligent microgrids – Part I: Decentralized and hierarchical control. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 60, No. 4. – P. 1254–1262. – DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2112317 (дата звернення: 12.10.2025).

4. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Capacity Statistics 2024 [Електронний ресурс]. – Abu Dhabi: IRENA, 2024. – 285 p. URL: https://irena.org/publications/renewable-capacity-statistics-2024 (дата звернення: 17.10.2025).

5. Bloomberg NEF. Battery Price Survey 2023 [Електронний ресурс]. – New York: Bloomberg, 2023. URL: https://about.bnef.com/blog/battery-price-survey-2023/ (дата звернення: 17.10.2025).

6. Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. // Science. – 2011. – Vol. 334. – P. 928–935. – DOI: https://doi.org/10.1126/science.1212741 (дата звернення: 17.10.2025).

7. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). Photovoltaics Report 2023 [Електронний ресурс]. – Freiburg: Fraunhofer ISE, 2023. – 55 p. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/ (дата звернення: 17.10.2025).

УДК 621.31

ПРОБЛЕМИ РЕВЕРСИВНИХ ПОТОКІВ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ ІЗ ВДЕ ТА МЕТОДИ ЇХ УСУНЕННЯ

Тоберт О. Ю.[1], асп., e-mail: tobert.sasha@gmail.com
Оберемок Д. О.[1], асп., e-mail: dimaoberemok1992@gmail.com
Markowska Katarzyna[2], PhD, prof., e-mail: katarzyna.markowska@polsl.pl
Kiełbasa Paweł[3], PhD, assoc. prof., e-mail: pawel.kielbasa@urk.edu.pl
Мірошник О. О.[1], д.т.н., проф., e-mail: omiroshnyk@btu.kharkiv.ua
Щур Т. Г.[1], к.т.н., доц., e-mail: taras.shchur@btu.kharkiv.ua
[1]Державний біотехнологічний університет
[2]Silesian University of Technology
[3]University of Agriculture in Krakow

Актуальність дослідження. Упродовж останніх років в енергетичній системі спостерігається стрімке зростання частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) – насамперед сонячних і вітрових електростанцій, значна частина яких підключається безпосередньо до розподільних мереж. Така децентралізація генерування змінює традиційні потоки електроенергії, що історично були унідирекційними – від вищих рівнів напруги до нижчих.

У сучасних умовах, особливо в години пікової сонячної генерації при низькому споживанні, виникають реверсивні потоки потужності (reverse power flow) – ситуації, коли енергія надходить від нижчих рівнів мережі до вищих [1]. Це створює низку технічних проблем: підвищення напруги на шинах, порушення роботи регулювальних трансформаторів (ОЛТС), неправильне спрацювання систем захисту, збільшення втрат потужності та перевантаження елементів мережі [2, 3].

Явище реверсивних потоків уже фіксується у розподільних мережах ЄС, Австралії та Китаю при проникненні ВДЕ понад 30–40% установленої потужності. В Україні ця проблема стає дедалі актуальнішою у зв'язку з масовим підключенням домашніх сонячних станцій та запровадженням систем «зеленого тарифу».

Метою дослідження є аналіз сучасних проблем, пов'язаних із реверсивними потоками потужності в електричних мережах з високою часткою ВДЕ, а також визначення основних методів їх виявлення, попередження та усунення. Завдання полягає в узагальненні сучасних підходів, що застосовуються для підвищення стійкості та надійності розподільних мереж у умовах двонаправлених потоків енергії.

Основні матеріали досліджень. Реверсивні потоки змінюють профіль напруги у розподільних мережах, що може спричинити перенапругу (voltage rise) та перекручення форми сигналу. Це негативно позначається на роботі побутових приладів, інверторів і трансформаторів.

В умовах активного експорту енергії у трансформаторів спостерігається підвищене нагрівання, а їхня електрична ізоляція старіє швидше. Крім того, традиційні системи захисту (наприклад, реле максимального струму) спроєктовані для одностороннього потоку. При зворотному напрямку енергії вони можуть не спрацювати або, навпаки, відключити здорову ділянку мережі. Це створює додаткові ризики для стабільності енергосистеми [4].

Ще однією проблемою є нестабільна робота ОЛТС (on-load tap changers) – регулювальних трансформаторів, які реагують на коливання напруги. У разі реверсивних потоків алгоритми керування можуть неправильно інтерпретувати зміни, викликаючи надлишкові перемикання та зношення контактів.

Одним із найбільш дієвих рішень є використання смарт-інвертерів, здатних виконувати функції регулювання напруги та реактивної потужності (Volt-VAR, Volt-Watt). Такі інвертери автоматично знижують вихідну потужність при перевищенні напруги, запобігаючи утворенню надлишкового експорту, впровадження алгоритму Volt-VAR дозволяє зменшити амплітуду перенапруг до 15–20% без втрати ефективності системи [5].

Іншим напрямом є використання систем накопичення енергії (BESS). Вони можуть акумулювати надлишкову генерацію вдень і віддавати енергію ввечері, коли навантаження зростає. Приклади успішних пілотних проєктів у Європі та США показують, що комбінація PV + BESS дозволяє майже повністю уникнути реверсивних потоків у побутових мікромережах.

Вагомим доповненням до таких заходів є використання технологій керування навантаженням (Demand Response), коли споживачі тимчасово збільшують або зменшують споживання залежно від стану мережі. Сучасні системи автоматизації «розумного дому» та промислові контролери дають змогу синхронізувати роботу побутових приладів, кондиціонерів, насосів чи холодильних установок з графіком генерації ВДЕ [4].

Не менш важливою є модернізація систем релейного захисту. Нові цифрові реле з двонаправленим вимірюванням струму та інтеграцією в системи ADMS/SCADA дозволяють підтримувати селективність навіть при зміні напрямку потоку потужності.

У разі надлишкового виробництва енергії, коли технічні заходи не дають бажаного ефекту, застосовується обмеження експорту (curtailment) – тимчасове зниження потужності генераторів або відключення частини PV. Однак останні дослідження вказують, що безсистемне відключення інверторів може призвести до порушення роботи критичних споживачів, тому таке регулювання має бути автоматизованим і координованим оператором мережі [5].

Найефективнішим напрямом сучасних досліджень є поєднання кількох методів. Комбіновані стратегії включають використання смарт-інвертерів, накопичувачів енергії, гнучких споживачів і вдосконаленого захисту.

Важливою складовою є цифрове моделювання мереж, яке дозволяє визначати критичні вузли, оцінювати вплив ВДЕ на напругу й розробляти оптимальні сценарії управління. У результаті знижується кількість аварійних відключень, стабілізується напруга, а ресурси мережі використовуються ефективніше.

Висновок. Реверсивні потоки потужності – невід'ємний наслідок енергетичного переходу до децентралізованої генерації. Вони створюють серйозні виклики для операторів мереж, зокрема перевантаження обладнання, погіршення якості електроенергії та зниження надійності системи. Ефективне розв'язання проблеми можливе лише при поєднанні технічних та організаційно-економічних заходів. До технічних належать впровадження смарт-інвертерів, систем накопичення енергії, цифрового захисту та модернізація регулювальних пристроїв. Організаційно важливим є створення ринку гнучкості, де споживачі й виробники можуть брати участь у балансуванні мережі. Таким чином, управління реверсивними потоками стає ключовим чинником надійності сучасних енергосистем і необхідною умовою подальшого розвитку «розумних» мереж майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Xie Y. The phenomenon and suppression strategy of overvoltage caused by reverse power flow in distribution networks. Frontiers in Energy Research, 2024. URL: https://surl.li/czabbt

2. Ćetković D. Voltage Rise Mitigation in Medium-Voltage Networks with High PV Penetration. Energies, 2024. URL: https://surl.li/quvwom

3. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. Energies. 2023. 16(6). 2638. https://doi.org/10.3390/en16062638

4. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical Modelling of Cogeneration Photoelectric Module Parameters for Hybrid Solar Charging Power Stations of Electric Vehicles. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2022, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397

5. Massaro F. et al. Mitigation of Reverse Power Flows in a Distribution Network using Electrolyser/Load. Energies, 2025. URL: https://surl.li/guimlt

УДК 621.314.2:629.113.004.4

АНАЛІЗ УЛЬТРАШВИДКИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ІЗ ПІДКЛЮЧЕННЯМ ДО МЕРЕЖ 6–10 КВ

Угарова А. Е., студ.
Ємельянова К. С., доктор філософії, e-mail: kateryna.bukhanova@kname.edu.ua
Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова

Актуальність дослідження зумовлена зростанням попиту на зарядні інфраструктури високої потужності для електромобілілів та необхідністю оцінки роботи мереж середньої напруги. Метою є аналіз технічних характеристик, режимів навантаження та ефективності ультрашвидких зарядних станцій при підключенні до мереж 6–10 кВ. Використано методи комп'ютерного моделювання, аналізу режимів навантаження та порівняння реальних схем підключення. Отримано дані про втрати енергії, допустимі падіння напруги та оптимальні топології підключення. Практичне значення полягає у розробленні рекомендацій для проєктування надійних та енергоефективних зарядних станцій.

Ключові слова: електрозарядна станція, середня напруга, навантаження, втрати енергії, оптимальна топологія.

Сучасний розвиток електромобільного транспорту стимулює створення зарядних станцій потужністю від 350 до 500 кВт і вище, здатних заряджати декілька автомобілів одночасно. Для забезпечення таких потужностей використання низьковольтних мереж стає неефективним, тому все частіше застосовується підключення до мереж 6–10 кВ [1]. Це рішення дозволяє зменшити струмові навантаження та втрати, проте створює нові виклики: виникнення гармонік, несиметрії фаз, пікових навантажень і підвищених вимог до стабільності напруги [2].

Метою роботи є техніко-аналітичне дослідження процесів живлення ультрашвидких зарядних станцій від мереж середньої напруги та розроблення рекомендацій щодо їх енергоефективної інтеграції. Основними завданнями визначено:

– аналіз електричних схем підключення зарядних комплексів;

– оцінку втрат у трансформаторах і кабельних лініях;

– моделювання напругових знижок при пікових режимах;

– пошук оптимальних топологій підключення із мінімальним впливом на мережу [3].

У моделюванні враховувались різні режими одночасної зарядки, що дозволило оцінити стійкість системи при змінному навантаженні. Наприклад, для станції потужністю 1 МВт, розташованої на відстані 300 м від трансформатора, падіння напруги без компенсації може сягати 2,5%, тоді як застосування компенсуючих пристроїв зменшує її до 1% [4]. Використання накопичувачів енергії (батарейних буферів) дало змогу знизити пікові струми на 20–30% і підвищити стабільність напруги [1], [4].

Розрахунки показали, що правильне розташування трансформаторів, скорочення довжини кабельних ліній і застосування фільтрів гармонік дозволяють значно покращити якість електроенергії та знизити втрати. Окрім того, модульна структура зарядних станцій із секціонуванням потужності забезпечує гнучкість роботи та спрощує технічне обслуговування [2], [3].

Висновок. Підключення ультрашвидких зарядних станцій до мереж 6–10 кВ є технічно доцільним і дає змогу ефективно задовольняти потреби електромобільного транспорту. Основні результати дослідження:

1. Найкращі енергетичні показники досягаються при мінімальній довжині кабельних ліній і використанні трансформаторів, розташованих безпосередньо біля зарядних модулів.

2. Застосування систем компенсації реактивної потужності та фільтрів гармонік покращує якість електроенергії і знижує теплові втрати [2].

3. Буферні енергонакопичувачі дозволяють уникнути перевантажень у пікових режимах і стабілізують роботу всієї системи [4].

4. Модульна структура підключення зарядних станцій забезпечує гнучкість у масштабуванні інфраструктури та зменшує вплив на мережу під час пікових навантажень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zhang, X., Li, H., & Wang, J. (2021). High-power electric vehicle charging stations: Planning, technology, and management. IEEE Transactions on Smart Grid, 12(4), 2845–2856.

2. Liu, Y., & Huang, S. (2022). Voltage drop and loss analysis in medium-voltage distribution feeders for EV charging. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 137, 107823.

3. Chen, Z., & Xia, Y. (2020). Impacts of fast charging loads on medium voltage distribution systems: Simulation and analysis. Energy Reports, 6, 1045–1054.

4. Wu, Q., & Tan, C. (2023). Energy storage integration in fast charging stations for grid support and peak shaving. Applied Energy, 333, 120678.

УДК 620.92

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОБНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Чумаченко С. М., д.т.н., с.н.с., e-mail: s_chum@ukr.net
Державний науково-дослідний інститут авіації
Пісня Л. А., к.т.н., e-mail: leonid_pisnya@ukr.net
Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»
Антощенков Р. В., д.т.н., проф., e-mail: roman.antoshchenkov@gmail.com
Черепньов І. А., к.т.н., доц., e-mail: i.cherepnev@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Фахівці з питань цивільного захисту на підставі аналізу надзвичайних ситуацій (НС) різного походження, відзначають особливу уразливість енергосистем. Наприклад, у лютому 2021 року зимовий шторм залишив мільйони жителів Техасу без доступу до електрики. Перебої в подачі електроенергії тривали до п'яти днів і призвели, зокрема, до сотень смертей від отруєння чадним газом, сильного переохолодження і загострення наявних в організмах існуючих захворювань [1]. Масові перебої в електропостачанні протягом десятків днів, а іноді і тижнів можуть призвести до припинення роботи складових життєзабезпечення, зокрема: станцій водопостачання та очищення стічних вод; створити серйозні проблеми для функціонування лікарень і госпіталів; транспорту; телекомунікаційних мереж і таке інше. Як зазначено у процитованій роботі жертвами цих подій часто стають групи населення, що уразливі з медичної точки зору або знаходяться в несприятливому становищі та яким важко підготуватися до відключення електроенергії і впоратися з їх наслідками. В даний час в науковому середовищі існує неоднозначне ставлення до широкого застосування так званих «поновлюваних» джерел енергії. Перш за все мова йде про вітрову і сонячну енергетику. Однак, поряд з явними перевагами ці технології мають і серйозні недоліки. За даними управління з енергоефективності та відновлюваних джерел енергії Міністерства енергетики США, енергія вітру може мати несприятливий вплив на навколишнє середовище, включаючи потенційне зменшення, фрагментацію або деградацію середовища існування дикої природи; а оцінка землекористування для сонячних електростанцій становить в середньому від 3,5 до 10 акрів на мегават для фотоелектричних систем загального призначення, тоді як оцінка для концентрованих сонячних електростанцій становить від 4 до 16,5 акрів на мегават [2]. Крім того, вітроенергетичні установки і панелі сонячних батарей чутливі до пошкодження та руйнації від дії первинних і вторинних факторів ураження НС природного, техногенного походження. В якості накопичувачів електроенергії активно використовують літій-іонні акумулятори. Станом на першу половину 2024 року частка нових установок для зберігання електроенергії з установкою літій-іонних акумуляторів склала близько 97%, ставши в даний час основною з абсолютною перевагою [3]. Одночасно в цій цитованій роботі зазначено, що накопичення енергії на літієвих батареях та їх широке застосування пов'язане з багатьма проблемами безпеки, які спричинені перегрівом літієвих батарей де часто аварії, відбуваються з пожежами та вибухами на електростанціях-накопичувачах енергії і являють собою серйозну загрозу для життя працівників і майна об’єктів енергетичного сектору.

Мета дослідження – розглянути альтернативи технологій виробництва електроенергії менш небезпечні для застосування в умова НС.

Основні матеріали досліджень. Одним з перспективних варіантів може бути використання мікробних паливних елементів (МПЕ). За даними [4] з ініціативи National Aeronautics and Space Administration (NASA) в ході космічних польотів провели серію вдалих експериментів з переробки відходів життєдіяльності людини в електрику. В даний час максимальна вихідна потужність, яку виробляють МПЕ аналогічна водневому паливному елементу PEM (proton exchange membrane – протонообмінна мембрана),які застосовуються на транспортних системах. В [5] наведені основні переваги, якими володіють МПЕ в процесі

експлуатації в порівнянні з іншими пристроями, які виробляють енергію з органічних речовин, а саме: МПЕ можуть функціонувати при низьких температурах, при функціонуванні МТЕ виділяється виключно вуглекислий газ (відсутні більш токсичні викиди) та ін. Крім генерування електроенергії МПЕ після відповідного доопрацювання можуть виробляти водень. Як відомо, стічні води сучасних міст являють собою вкрай небезпечну суміш небезпечних речовин. Проблема очищення стічних вод дуже актуальна для України. За результатами узагальнення даних державного обліку водокористування у 2021 році у поверхневі водні об'єкти скинуто 4684,6 млн куб. м стічних вод, у тому числі: забруднені складають 541,5 млн куб. м (11,6 %), нормативно-очищені – 1430 млн куб. м (30,5 %) та нормативно-чисті без очистки – 2712,9 млн куб. м (57,9 %) [5]. Пройшовши обробку в МПЕ такі сполуки, як ацетат, пропіонат і бутират, ретельно розщеплюються на молекули вуглекислого газу і води. Також можливе видалення сульфідів зі стічних вод [6]. В [7] наведені характеристики МПЕ розрахованого для використання в умовах НС, зокрема зазначено, що створений зразок був протестований як в лабораторних, так і в польових умовах, і на думку авторів цитованої роботи попередні випробування продемонстрували багатообіцяючі результати щодо корисності цього нового альтернативного джерела енергії.

Висновок. З огляду всього вищесказаного підсумуємо, що активне впровадження МПЕ визначаються як перспективна технологія в екологічному та енергетичному аспектах, в тому числі в умовах НС. Широкий спектр можливостей МПЕ вирішує специфічні проблеми, такі як очищення стічних вод та живлення електроприладів, і це один з найбільш перспективних напрямів впроважєення, що співпадає з висновками вишукувань зазначеними також в [8, 9].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Dugana J., Bylesb D., Mohaghegh S. *International Journal of Disaster Risk Reduction.* 2023. Vol. 85. 103501. doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103501.

2. Ebube O., Akan E. The Other Side: Negative Impacts of Exploiting Renewable Energy Sources. *European Journal of Engineering and Technology Research.* 2021. Vol. 6, № 3. P. 30-33. doi.org/10.24018/ejers.2021.6.3.2384.

3. Pan W. Research Progress on Risk Prevention and Control Technology for Lithium-Ion Battery Energy Storage Power Stations: A Review. *Batteries.* 2025. Vol.11, № 8. 301. doi.org/10.3390/batteries11080301.

4. Slatea A., Whiteheada K, Brownson D. and all. Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2019. Vol. 101. P. 60–81. doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044.

5. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf (дата звернення: 30.10. 2025).

6. Bazina N., Ahmed T, Almdaaf M. and all. Power generation from wastewater using microbial fuel cells: A review. *Journal of Biotechnology.* 2023. Vol. 374. P. 17-30. doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.07.006.

7. Ash T., Doyle E., Ssenyonga G. and all. Use of Microbial Fuel Cells for Power Generation in Emergency Situations. *Journal of the Washington Academy of Sciences.*2017. Vol.103, № 4. P. 17-24.

8. Kurniawan T., Othman M., Liang X. and all. Microbial Fuel Cells (MFC): A Potential Game-Changer in Renewable Energy Development. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. 16847. doi.org/10.3390/su142416847.

9. Золотко, Д. С. Мікробний паливний елемент / Д. С. Золотко, Г. Є. Монастирський, А. В. Гільчук // Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали XXII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, [Київ], 13−17 травня 2024 р. / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2024. – С. 71-75. URI: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67001

СЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 004.896

МАЛІ РОБОТИЗОВАНІ ПЛАТФОРМИ («РОЇ» РОБОТІВ). СИСТЕМИ ГРУПОВОГО УПРАВЛІННЯ («РОЄМ») ДЛЯ ВИКОНАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЗАВДАНЬ

Братчикова О. В., викл., e-mail: olga19607755@gmail.com
Братчиков О. С., викл., e-mail: xahter3@gmail.com
ВСП «Харківський фаховий коледж харчової промисловості ДБТУ»

Актуальність дослідження. Концепція ройового інтелекту, натхненна поведінкою соціальних комах, птахів та риб, стала рушійною силою для розробки малих роботизованих платформ, здатних до колективної взаємодії. Рої роботів, що складаються з десятків, сотень або навіть тисяч відносно простих і недорогих агентів, демонструють потенціал для вирішення складних завдань, які є недосяжними для окремих, більш складних роботів. Цей підхід, відомий як ройова робототехніка, фокусується на розробці децентралізованих систем управління, де глобальна поведінка групи виникає з локальних взаємодій між окремими роботами та їхнім середовищем. Основна перевага такого підходу полягає у високій відмовостійкості, масштабованості та адаптивності системи. Втрата кількох агентів не призводить до колапсу всієї системи, а додавання нових роботів дозволяє легко масштабувати можливості рою.

Мета дослідження полягає в розгляді ключових аспектів систем групового управління роями роботів для виконання комплексних завдань, аналізі архітектури управління, алгоритмів координації та перспективних сфер застосування ройової робототехніки. Основний фокус робиться на дослідженні того, як децентралізовані системи управління дозволяють досягти високої відмовостійкості, масштабованості та адаптивності, використовуючи принципи ройового інтелекту.

Основні матеріали досліджень. Системи управління роєм можна умовно поділити на централізовані, децентралізовані та гібридні. У ***централізованій*** архітектурі єдиний центр управління приймає всі рішення та надсилає команди кожному роботу. Цей підхід спрощує координацію, але є вразливим до відмови центрального вузла і погано масштабується. На противагу цьому, ***децентралізовані*** системи є наріжним каменем ройової робототехніки. В таких системах кожен робот приймає рішення автономно, базуючись на локальній інформації, отриманій від власних сенсорів та через комунікацію з найближчими сусідами. Глобальна узгоджена поведінка виникає як емерджентна властивість цих локальних взаємодій. ***Гібридні*** архітектури намагаються поєднати переваги обох підходів. Наприклад, рій може діяти переважно децентралізовано, але отримувати глобальні цілі або оновлення від центральної станції, що не бере участі в миттєвому управлінні. Це дозволяє поєднувати гнучкість децентралізації з можливістю стратегічного планування. Що стосується алгоритмів координації для комплексних завдань, для їх виконання таких, як розвідка, моніторинг, пошук та рятування, або колективне транспортування, рої роботів використовують спеціалізовані алгоритми. Одним з фундаментальних підходів є моделювання на основі поведінки, де загальна задача розбивається на прості поведінкові патерни (наприклад: уникати перешкод, рухатися до цілі, тримати дистанцію).

Серед популярних алгоритмів координації виділяють:

Алгоритми на основі потенційних полів. Роботи рухаються в умовному «силовому полі», де цілі створюють притягаючі сили, а перешкоди та інші роботи — відштовхуючі. Це дозволяє ефективно реалізовувати навігацію та уникнення зіткнень.

Формування та підтримка строю (Formation Control). Для виконання завдань, що вимагають певного геометричного розташування (наприклад, спільне перенесення об'єкта

або створення комунікаційної мережі), використовуються алгоритми, які дозволяють роботам займати та підтримувати задані позиції відносно один одного.

Розподіл завдань (Task Allocation). В гетерогенних роях або при виконанні багатоетапних завдань виникає необхідність ефективно розподіляти підзадачі між агентами. Алгоритми на основі ринкових механізмів (аукціонів) є одним з популярних рішень, де роботи «ставлять» на завдання, виходячи зі своїх можливостей та поточного стану.

Ройова робототехніка має величезний потенціал у багатьох сферах. У ***цивільній галузі*** це моніторинг навколишнього середовища, точне землеробство, інспекція інфраструктури (мости, трубопроводи), а також пошуково-рятувальні операції в зонах стихійних лих. У ***військовій справі*** рої дронів можуть використовуватися для розвідки, спостереження, радіоелектронної боротьби та ураження цілей, створюючи асиметричну перевагу. Незважаючи на значний прогрес, залишається низка невирішених проблем. Одним з головних викликів є розробка надійних систем комунікації, стійких до перешкод та кібератак, особливо в умовах відсутності GPS. Іншою складною задачею є верифікація та валідація емерджентної* поведінки рою, оскільки передбачити всі можливі результати локальних взаємодій вкрай складно. Крім того, питання взаємодії людини з роєм (Human-Swarm Interaction) потребує розробки інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів, що дозволять оператору ефективно керувати колективом, а не кожним роботом окремо.

Висновок. Системи групового управління роями малих роботизованих платформ є перспективною технологією з широким спектром застосування. Перехід від централізованих до децентралізованих архітектур управління, заснованих на локальних взаємодіях, забезпечує системам високу масштабованість, гнучкість та відмовостійкість. Алгоритми, натхненні природою, дозволяють рояям ефективно вирішувати комплексні завдання, такі як пошук, навігація та колективна дія. Подальший розвиток у сферах комунікації, верифікації поведінки та взаємодії «людина–рій» відкриє нові горизонти для практичного застосування цієї революційної технології.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. Swarm Intelligence. 2013. Vol. 7, No. 1. P. 1–41. DOI: 10.1007/s11721-012-0075-2.

2. Şahin E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. Swarm Robotics: 5th International Workshop, ANTS 2006, Brussels, Belgium, September 4-7, 2006. Revised Selected Papers. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. P. 10–20.

3. Christensen D. J. T., Dorigo M., Støy K. A review of swarm robotics. Technical Report TR-2008-130. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, 2008.

4. Dorigo M., Birattari M., Brambilla M. Swarm robotics. Scholarpedia. 2014. Vol. 9, No. 1. P. 1463. DOI: 10.4249/scholarpedia.1463.

5. Navarro I., Matía F. An introduction to swarm robotics. ISRN Robotics. 2013. Vol. 2013. Article ID 602431. DOI: 10.5402/2013/602431.

6. Winfield A. F. T. Towards a taxonomy for swarm robotics. Proceedings of the 2006 TAROS conference. Guildford, UK, 2006. P. 268–275.

7. Bayindir L., Şahin E. A review of studies in swarm robotics. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2007. Vol. 15, No. 2. P. 115–147.

8. Garnier S., Gautrais J., Theraulaz G. The biological principles of swarm intelligence. Swarm Intelligence. 2007. Vol. 1, No. 1. P. 3–31.

*Емерджентна поведінка рою – це складна, високоорганізована колективна поведінка групи індивідуальних агентів (наприклад, птахів, риб, комах, або безпілотних систем), яка виникає в результаті простих локальних взаємодій між цими агентами та їхнім оточенням, і при цьому не контролюється централізовано.

УДК 62.83.52:621.3

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕТЮЧИХ НОЖИЦЬ ЗАГОТІВЕЛЬНОГО СТАНА 750/850/950

Бреславець Д. Р., магістрант, e-mail: Dmytro.Breslavets@ieee.khpi.edu.ua
Тукалов І. О., к.т.н., доц., e-mail: Ihor.Tukalov@ieee.khpi.edu.ua
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Актуальність дослідження. У даний час економічна ситуація вимагає не підвищення продуктивності, а зниження витрат на виробництво продукції. Летючі ножиці безперервно-заготівельних прокатних станів – це потужні високодинамічні механізми, тому оптимізація електроприводу і законів регулювання за критерієм мінімізації енерговитрат є дуже важливим.

Мета дослідження – оптимізація тахограм електропривода летючих ножиць безперервно-заготівельного прокатного стана 750/850/950 за критерієм мінімізації енерговитрат.

Основні матеріали досліджень. У прокатних цехах металургійних заводів широко застосовуються летючі ножиці різних типів, призначені для розрізання прокату, який рухається. Такі ножиці оснащені автоматизованим електроприводом і системою автоматичного керування мірним різом заготовки. Ножиці для розрізання великих перетинів виконують, зазвичай, безредукторними з кривошипно-шатунним механізмом, що виконує різ при кожному оберті (такий тип ножиць застосовано на стані 750/850/950). Розрізання прокату на задані мірні довжини здійснюється зниженням швидкості ножів ω відносно швидкості прокату ω_c. Вибір закону зміни швидкості на ділянці роботи на зниженій швидкості проводиться з двох основних міркувань: ступеня завантаження двигуна по теплу і ступеня складності системи управління, що реалізує закон руху механізму.

На рис. 1 наведені два графіки зміни швидкості – найпростіший трикутний та найефективніший параболічний [1].

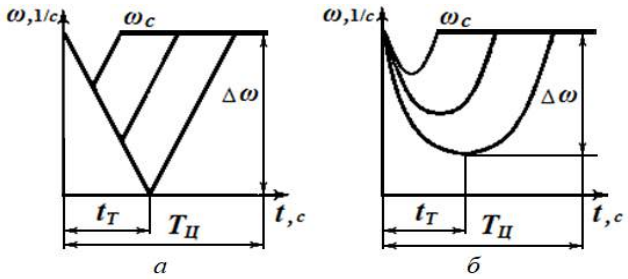


Рисунок 1 – Діаграми швидкості летючих ножиць
***а* – трикутна; *б* – параболічна**

Параболічні закони зміни швидкості, рис. 1*б*, найбільш економічні з погляду енергетичних витрат, однак, їхня реалізація значно складніша. Для їх розрахунку використовують ізопериметричні варіаційні закони Лагранжа та Ейлера [2].

Умовою рівності довжин заготовки є рівність площ діаграм зміни швидкості S_a , $S_б$, які визначаються за формулами [1]:

$$S_a = \frac{\omega_c^{\,2}}{\varepsilon_a} = S_б = 2\int_0^{t_T}\left(\varepsilon_{б\max} t - \frac{\varepsilon_{б\max}}{2t_T}t^2\right)dt = \frac{2\varepsilon_{б\max} t_T^{\,2}}{3}, \qquad (1)$$

де ε_a , $\varepsilon_{б\max}$ – відповідні кутові прискорення, м/с^2; t_T – час гальмування, с.

Порівняємо нагрівання двигуна для цих тахограм, виходячи з еквівалентного моменту $M_{екв}$ за весь період циклу $T_Ц$:

$$M_{екв\ a} = \sqrt{\left(M_{дин}^2 \cdot 2t_T + M_p^2 t_p\right)/T_Ц} = \sqrt{\left(2J^2\varepsilon_a^2 t_T + M_p^2 t_p\right)/T_Ц}\ ; \qquad (2)$$

$$M_{екв\ б} = \sqrt{\left(\int_0^{2t} M_{дин}^2 dt + M_p^2 t_p\right) \Big/ T_Ц} = \sqrt{\left(2J^2 \varepsilon_{б\max}^2 t_T / 3 + M_p^2 t_p\right) \Big/ T_Ц}\ , \qquad (3)$$

де $M_{дин}$ – динамічний момент на ділянці регулювання швидкості, Нм; M_p, t_p – момент і час різу відповідно, Нм, с; J – момент інерції, кгм^2.

Витрати енергії в якірному ланцюзі визначаються інтегралом:

$$Q = \int_0^{T_Ц} i^2 R_E dt = \frac{R_E J^2}{2(k\Phi)^2} \int_0^{t_T} \varepsilon^2(t)\ dt\ , \qquad (4)$$

де i – струм якоря, А, R_E – еквівалентний опір якірного ланцюга, Ом.

З урахуванням знайдених для цих тахограм значень прискорень, співвідношення витрат, розрахованих за рівнянням (4), становитиме $\Delta = Q_б / Q_а = 0{,}75$ (не враховуючі момент різу). Тобто економія енергії лежить у межах до 25 %.

Оптимізація і дослідження електропривода ножиць кривошипно-шатунного типу стану 750/850/950 з двоякірним двигуном 2П2 - 23/66 - 2,75 ($P_н$=2х1750 кВт; $U_н$=730 В; $I_н$=2590 А; $M_н$=670 кНм; $n_н$=50 об/хв; R_E=0,02068 Ом) були проведені з використанням методики і засобів синтезу параболічних тахограм [3]. Порівнювались процеси для граничної трикутної (швидкість знижується до нуля) та параболічної тахограм при відпрацюванні однакового переміщення прокату в проміжку між розрізанням. Отримані графіки наведені на рис. 2.

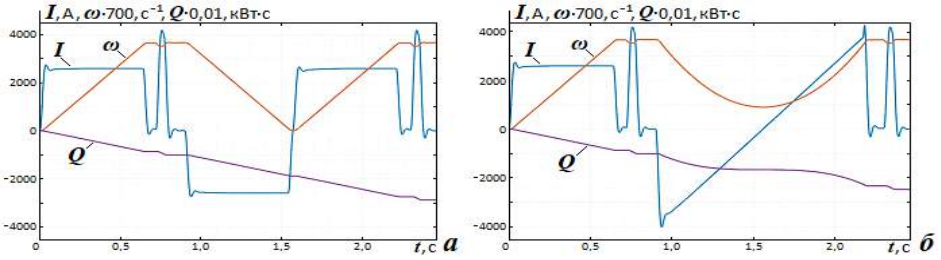


Рисунок 2 – Тахограми відпрацювання мірної довжини прокату
а – гранична трикутна; *б* – оптимізована параболічна

З графіків визначено: лінійний закон зміни швидкості ножиць при відпрацюванні граничної мірної довжини заготовки потребує 172,9 кВт·с електроенергії, а параболічний тільки 131,6 кВт·с. Економія енергії сягає 41,3 кВт·с (це дорівнює 23,9 % у кожному циклі, що вельми близько до теоретичного значення).

Висновок. Проведений аналіз перехідних процесів за різних законів зміни швидкості розробленого електроприводу летючих ножиць стану 750/850/950 підтвердив теоретичні положення. Безперервні прокатні стани це продуктивні механізми. Кількість циклів при розрізанні кожної заготовки на мірні довжини сягає декілька десятків, тому оптимізація за крите1рієм енергозбереження дуже важлива. Сучасний розвиток засобів керування дає змогу однозначно рекомендувати перехід до реалізації оптимальних параболічних тахограм, як за допомогою додаткових пристроїв з параболічними задавачами інтенсивності, так і засобами мікропроцесорної техніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тукалов І. О., Асмолова Л. В. Порівняльний аналіз енергетичних витрат за різних законів зміни швидкості приводу летючих ножиць // Вісник НТУ «ХПІ»: Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. Харків: НТУ «ХПІ», 2001. С. 360–362.

2. Герасим’як Р. П. Оптимальні системи автоматичного управління електроприводів. Одеса: ОДПУ, 1998. 76 с.

3. Бреславець Д. Р., Тукалов І. О. Моделювання деяких режимів високодинамічного електропривода // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді: Всеукр. наук.-практ. конф., 2 квітня 2024 р. Харків: ДБТУ, 2024. С. 82.

УДК 543.422.3:537.8:637.344

АЛГОРИТМІЗАЦІЯ АНАЛІЗУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ І МАШИННИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

Василенко Д. О., асп., hideseptember24@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Розвиток автоматизованих систем контролю якості харчової продукції вимагає поєднання спектральних методів аналізу з алгоритмами машинного навчання для підвищення точності, швидкодії та адаптивності вимірювань. Метою даної роботи є розроблення та верифікація методології гіперспектрального аналізу білкових матриць молочних продуктів із застосуванням штучного інтелекту для класифікації та прогнозування показників якості.

Для моделювання використано гіперспектральні зображення з діапазонів NIR та Vis, отримані за допомогою лабораторного сканера та безпілотного комплексу (UAV). Попередня обробка даних включала нормалізацію сигналів, усунення шумів методом головних компонент (PCA) та побудову вегетаційно-спектральних індексів, адаптованих під білкові середовища.

Для побудови моделей застосовано алгоритми Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Gradient Boosting (GB) та глибокі нейронні мережі (DNN). Оцінювання точності здійснювалося за коефіцієнтом детермінації (R^2), середньоквадратичною помилкою (RMSE) та індексом відтворюваності.

Крім того, проведено порівняльний аналіз впливу електромагнітних завад різної інтенсивності на стабільність спектральних сигналів, що дало змогу сформувати порогові рівні допустимого шуму для різних конфігурацій сенсорів. У межах роботи також розроблено модуль інтелектуальної компенсації шумів, який коригує вхідні дані в реальному часі, зменшуючи втрати точності під час виробничих коливань. Запропонована адаптивна структура MCDA+ дозволила не лише враховувати технічні характеристики обладнання, а й інтегрувати енергетичну ефективність, експлуатаційні витрати та сталість технологічного циклу в загальну систему оцінювання.

Дослідження показало, що сучасні методи контролю якості молока, які використовують світло (зокрема, флуоресцентний аналіз білків), дуже чутливі до електромагнітних завад (ЕМЗ). Ці завади виникають від працюючих поруч промислових машин і кабелів. Змінні поля від ЕМЗ можуть збивати інтенсивність і стабільність світлового сигналу від білків, роблячи результати аналізу неточними або непостійними. Щоб забезпечити надійність, ми повинні визначити, наскільки сильні можуть бути ці завади, перш ніж вони почнуть шкодити. Крім того, необхідно розробити спеціальні комп'ютерні програми (алгоритми), які зможуть автоматично відфільтровувати цей «шум» і показувати лише справжній результат вимірювання.

Висновок. Отримані результати підтверджують потенціал поєднання гіперспектрального аналізу та машинного навчання в автоматизованих лініях контролю якості відповідно до вимог ISO/IEC 17025. Подальші дослідження будуть спрямовані на:

- розроблення адаптивних алгоритмів компенсації електромагнітних завад у режимі реального часу;
- створення цифрових двійників лабораторних систем для валідації моделей;
- формування універсальних калібрувальних баз даних спектрів для різних типів молочних продуктів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.

1. Василенко, Д. О. Розробка сенсорної системи для визначення фальсифікації молочної продукції за допомогою електричних параметрів [Текст] / Д. О. Василенко, М. С. Сорокін // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Держ. біотехнол. ун-т, 6 листоп. 2024 р. – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 122-123.

УДК 621.313.3

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У ФУНКЦІЇ ЗАВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОЧИХ МАШИН

Вовк О. Ю., к.т.н., доц., e-mail: Oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність досліджень. На сьогодні для надання руху різним типам робочих машин і агрегатів застосовують електропривод, на електроспоживання якого йде до 70 % виробленої електроенергії у країнах Європи. Близько 65–75 % всіх електроприводів базується на асинхронних двигунах. За даними практики більша частина цих електродвигунів значний час працюють не з оптимальним завантаженням, що зменшує їх коефіцієнт корисної дії у порівнянні з максимальним значенням. На сучасному етапі для підвищення енергоефективності таких електроприводів застосовують певні способи регулювання, які призводять до економії 40–50 % споживаної електроенергії. На дослідження і розробку таких електроприводів спрямована значна кількість робіт, у яких розглядаються різні способи керування. Проте всі вони майже не враховують вид механічної характеристики робочої машини, яка приводиться в дію асинхронним двигуном приводу, що призводить до зниження точності керування щодо енергозбереження [1–4].

Мета дослідження. Тому метою дослідження є отримання рівнянь регулювання напруги на затискачах асинхронного двигуна у функції коефіцієнта завантаження, які враховують вид механічної характеристики робочої машини і дозволяють мінімізувати втрати потужності в електродвигуні.

Основні матеріали досліджень. Для досягнення поставленої мети спочатку було отримано залежність втрат активної потужності в асинхронному двигуні у функції прикладеної напруги і ковзання із застосуванням Г-подібної схеми заміщення електродвигуна. При цьому прикладена напруга у вказаних рівняннях врахована через відношення її поточного значення до номінального. Далі здійснено аналіз механічної характеристики електродвигуна і механічних характеристик робочих машин, застосовуючи їх лінеаризацію, що дозволило врахувати види механічних характеристик робочих машин. При цьому було розглянуто робочі машини з не залежною від швидкості, лінійно зростаючою, параболічною і гіперболічною механічними характеристиками. Внаслідок вказаного аналізу отримано рівняння ковзання асинхронного двигуна на робочій ділянці його механічної характеристики (до критичної швидкості) у функції параметрів електродвигуна і робочої машини з врахуванням виду її механічної характеристики. Подальша підстановка вказаних рівнянь ковзання у вирази втрат активної потужності дозволила отримати рівняння, які враховують вид механічної характеристики робочої машини і дозволяють мінімізувати втрати потужності в електродвигуні шляхом регулювання напруги на затискачах асинхронного двигуна в залежності від його завантаження.

Для електродвигуна приводу робочої машини з незалежною від швидкості механічної характеристикою рівняння таке:

$$\Delta P_{\Sigma} = \left(\Delta P_{const.н} + \Delta P_{var.н} \cdot \frac{\left(r_1' + r_2''/s_н\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}{\left(r_1' + \dfrac{r_2'' \cdot k_u^2}{s_н \cdot k_з}\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2} \right) \cdot k_u^2 . \qquad (1)$$

де $\Delta P_{const.н}$, $\Delta P_{var.н}$ – відповідно постійні і змінні втрати в електродвигуні при номінальному завантаженні і номінальній напрузі, *Вт*; k_u – відношення поточного значення живлячої напруги до номінального значення; $k_з$ – коефіцієнт завантаження електродвигуна; $s_н$ – номінальне ковзання електродвигуна; $r_1', x_1', r_2'', x_2'', r_1, x_1$ – параметри Г-подібної схеми заміщення електродвигуна, *Ом*.

Для електродвигуна приводу робочої машини з лінійно зростаючою механічної характеристикою рівняння таке:

$$\Delta P = \left(\Delta P_{const.н} + \Delta P_{var.н} \cdot \frac{\left(r_1' + r_2''/s_н\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}{\left(r_1' + r_2'' \cdot \left(\frac{k_u^2}{k_э \cdot s_н} + \frac{1-M_*}{1-s_н} \right) \Big/ \left(M_* + \frac{1-M_*}{1-s_н} \right) \right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2} \right) \cdot k_u^2 . \quad (2)$$

де M_* – відносне значення моменту зрушення робочої машини.

Для електродвигуна приводу робочої машини з параболічною механічної характеристикою рівняння таке:

$$\Delta P = \left(\Delta P_{const.н} + \Delta P_{var.н} \frac{\left(r_1' + r_2''/s_н\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}{\left(r_1' + \frac{r_2''}{1 + \frac{(1-s_н)}{2 s_н k_э} \left(k_u^2 - \sqrt{k_u^4 (1-s_н) + 4 s_н k_э (1-M_*)\left(k_u^2 + k_э s_н M_*\right)} \right)} \right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2} \right) \cdot k_u^2 . \quad (3)$$

Для електродвигуна приводу робочої машини з гіперболічною механічної характеристикою рівняння таке:

$$\Delta P = \left(\Delta P_{const.н} + \Delta P_{var.н} \frac{\left(r_1' + r_2''/s_н\right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2}{\left(r_1' + \frac{r_2''}{\frac{1}{2}\left(\left(1 + \frac{k_э}{k_u^2} s_н M_*\right) - \sqrt{\left(1 - \frac{k_э}{k_u^2} s_н M_*\right)^2 - 4 \frac{k_э}{k_u^2} (1-M_*)(1-s_н)} \right)} \right)^2 + \left(x_1' + x_2''\right)^2} \right) \cdot k_u^2 . \quad (4)$$

У результаті чисельного розв'язання (1) – (4) у програмі MS Exel через надбудову «Пошук рішення» для асинхронного двигуна типорозміру АИР100S4 у разі приводу робочих машин з різними видами механічних характеристик отримано графічні залежності $k_u = f(k_э)$ за умови $\Delta P \rightarrow min$. В результаті апроксимації цих залежностей отримано такі рівняння для регулювання напруги у функції коефіцієнта завантаження:

$$k_u = -0,895 \cdot k_э^2 + 1,784 \cdot k_э + 0,089 ; \quad (5)$$

$$k_u = -0,83 \cdot k_э^2 + 1,709 \cdot k_э + 0,09 ; \quad (6)$$

$$k_u = -0,872 \cdot k_э^2 + 1,758 \cdot k_э + 0,09 ; \quad (7)$$

$$k_u = -0,783 \cdot k_э^2 + 1,653 \cdot k_э + 0,091 . \quad (8)$$

Рівняння (5) призначено для випадку приведення у дію робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою, рівняння (6) – із лінійно зростаючою механічною характеристикою, рівняння (7) – із параболічною механічною характеристикою, рівняння (8) – із гіперболічною механічною характеристикою.

Висновок. У роботі отримані рівняння, які дають можливість регулювати напругу на затискачах асинхронного двигуна у функції коефіцієнта завантаження з метою мінімізації втрат потужності в електродвигуні та враховують вид механічної характеристики робочої машини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Terron-Santiago C., Martinez-Roman J., Puche-Panadero R., Sapena-Bano A. A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling. *Sensors*, 2021, 21, P.4855. https://doi.org/10.3390/s21144855

2. Вовк О.Ю., Квітка С.О. Ресурсозберігаюче управління асинхронними електродвигунами прикладеною напругою. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2020, 10(2). https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-2-27

3. Ghassemi M. Accelerated insulation aging due to fast, repetitive voltages: A review identifying challenges and future research needs. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(5), P.1558-1568. https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008176

4. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Стребков О. А., Волошина А.А. Енергозберігаючі режими роботи асинхронних електродвигунів при змінному завантаженні. *Праці ТДАТУ*, 2019, 19(3), С. 142–150.

УДК 621.305.12

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА

Волков С. М., магістр, e-mail: volkov23_23@gmail.com
Чаусов С. В., к.т.н., доц., e-mail: etem@tsatu.edu.ua
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Як відомо, потенційно технічно досяжний надлишок біосировини в Україні становить 26 млн т/рік, це дає підстави розглядати саме цей вид палива як найперспективніший, про що свідчать існуючі урядові нормативні документи [1].

На сьогодні, серед наявних, гідравлічних, екструдерних та ударних пресів перспективними, враховуючи техніко-економічні характеристики, є останні, насамперед тоді, коли мова йде про брикетування соломи. Саме детальний аналіз свідчить про високу енергоємність існуючого процесу виробництва твердого біопалива і дуже низьку якість кінцевого продукту, які зумовлені великими нерівномірностями дозування сировини і значними коливаннями її вологості [2, 3].

Метою дослідження є дослідження процесу переробки твердого біопалива та розробка автоматизованої системи керування електроприводом шнекового дозатора.

Основні матеріали досліджень. Широке розповсюдження паливні гранули отримали насамперед завдяки особливостям процесу їхнього згоряння [4, 5]. Адже згораючи, паливні гранули виділяють відповідну кількість тепла, при цьому їх теплотворність паливних гранул прирівнюють до традиційних видів палива, тоді як кількість шкідливих речовин, що виділяється, – незначна.

Технологічний процес виробництва гранул із деревини залежить від вихідної сировини та включає такі операції: підготовку сировини → сушіння → подрібнення → гранулювання → охолодження і пакування.

Основними механізмами виробництва паливних гранул є преси, які бувають з кільцевою і плоскою матрицями. В кільцевих пресах сировина продавлюється барабанами через матрицю і обрізується назовні. Енергозатрати на пресування в обох випадках однакові. Потім гранули охолоджують і упаковують.

Для реалізації задекларованих напрямів в Україні та інших країнах виготовляється цілий ряд технологічних потокових ліній для виробництва твердого біопалива. Всіх їх об’єднує спільний недолік – низька якість кінцевого продукту, пов’язана з неможливістю механічними методами згладити базові недетерміновані характеристики біосировини.

Тому розробка системи керування потоковими лініями продукування твердого біопалива з повноцінними теплотехнічними і товарними характеристиками є актуальною задачею для агропромислової енергетики.

Дозування складових є основною операцією в технологіях приготування сумішей. Якість кінцевого продукту при цьому залежить, в основному, від дотримання заданого за рецептом співвідношення між вхідними компонентами, тобто від якості роботи дозаторів [6]. Тому, незалежно від типу і принципу дії дозуючих пристроїв тут переслідується основна технічна задача – підвищення їх точності в робочому діапазоні.

Для приготування суміші, інтенсивність потоків встановлюють попередньо для того, щоб співвідношення їх складових відповідало потрібній рецептурі. В тому випадку використовують «зв’язні системи", коли апаратура керування всіх дозаторів зв’язана між собою, а один із компонентів виступає в ролі «ведучого», інші – «веденими». Таке дозування називають пропорційним, що забезпечує залежність:

$$Q_i = k_1 Q_1 + k_2 Q_2 + \ldots k_{n-1} Q_{n-1},$$

де Q_1 і Q_n – витрати матеріалу першого і *n*-го виду;

k – коефіцієнт пропорційності.

При умові наявності коливань:

$$\sum_{1}^{n} Q_i(t) \pm 25\ \%$$

У цьому випадку бажано використовувати багатозв'язну систему керування з нерегульованим дозатором основного компонента. Тоді сигнал, що впливає на інші дозатори буде пропорційним

$$I_1 = k_i\left[Q_0(t) - Q_{0зад.}\right] + Q_i(t),$$

де $Q_{0зад.}$ – задане значення продуктивності основного потоку;

k_i – коефіцієнт пропорційності.

Для реалізації таких способів керування доцільно використовувати системи регульованого електропривода на базі перетворювачів частоти (ПЧ), що дозволяють незалежно від режиму роботи ЕП забезпечувати високий коефіцієнт потужності силового кола і водночас хороші статичні та динамічні показники системи регулювання.

Висновок. У результаті було зафіксовано зменшення витрат електроенергії на виробництво біопалива та покращилася якість дозування, з підвищенням точності дозування компонентів у потоці, шляхом зв'язного регулювання продуктивності дозаторів. Статистичний аналіз процесу безперервного дозування сировини дає можливість визначити основні характеристики процесу $m_x, c, R_x(t), S(\omega)$, дозволяє сформулювати ключові вимоги до діапазонів роботи робочих машин, які повинні знаходитися в межах – по ідентифікації витрат – від 0,2 до 0,7 т·год$^{-1}$, по частоті обертання електродвигуна шнека або змішувача – від 30 до 157 с$^{-1}$.

Використання запропонованої технології виробництва біопалива та перевірка технології в умовах виробництва може показати: продуктивність технологічної лінії, точність дозування вагового дозатора з тензодатчиком, якість змішування в горизонтальному змішувачі – до 95,0 %. Використання запропонованої технології виробництва біопалива в умовах господарства може знизити питомі капітальні вкладення на виробництво однієї тонни біопалива, та питомі виробничі витрати, а також отримати річний економічний ефект в порівнянні з базовим варіантом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива : монографія / Я. Б. Блюм, Г. Г. Гелетуха, І. П. Григорюк [та ін.]. — К. : Аграр Медіа Груп, 2010. — 408 с.

2. Корчемний М.О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. О. Корчемний, В. С. Федорейко, В. П. Щербань. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 84-90 с.

4. Червінський Л. С. Моделювання регульованого електропривода, апаратів та потокових ліній / Л. С. Червінський, І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко [та ін.]. – К.: Агроосвіта, 2013. – 240 с.

5. Kazmierkowski M.P. A Simple control system for current source inverter fed induction motor drives / M.P. Kazmierkowski, H.J. Hopcke // IEEE trans. and. Appl. -Vd. -IA-21. — 1985. — P. 617–623.

6. Жулай Є.Л. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: підручник. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.

УДК 621.340.24

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ДВИГУНА В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Гузенко В. В. к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@gmail.com
Патока І. О., бакалавр, e-mail: patoka.ivan2018@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Питання забезпечення стабільної роботи електроприводів змінного струму є надзвичайно актуальним, оскільки від цього залежить ефективність і надійність усього електромеханічного обладнання. Одним із ключових чинників, що впливають на параметри електроприводу, є температура елементів двигуна, насамперед обмоток статора та ротора. Відомо, що під час роботи двигуна через електричні втрати відбувається його нагрівання [1]. У результаті змінюється активний опір обмоток, знижується ККД, змінюються електромагнітні параметри, а це може спричинити збої в роботі системи керування. Для векторних електроприводів, де точність моделі двигуна визначає точність регулювання, така нестабільність особливо небезпечна [2].

Крім того, робота двигуна у нестаціонарних режимах (пуски, гальмування, перевантаження) супроводжується різкими коливаннями температури. Через інерційність теплових процесів температура змінюється із запізненням, тому звичайний розрахунок або оцінка без вимірювань часто виявляються неточними. Це створює потребу у системі, що здатна вимірювати температуру в реальному часі**,** аналізувати отримані дані та враховувати їх у керуванні приводом.

Мета дослідження – забезпечення стабільної роботи електроприводів шляхом вдосконалення системи контролю за температурою електричного двигуна змінного струму.

Основні матеріали досліджень. Нестаціонарні теплові процеси виникають у всіх режимах експлуатації двигуна. Їх особливістю є значне запізнення між моментом зміни навантаження і відповідною реакцією температури обмоток. Підвищення температури призводить до зростання опору обмоток, що викликає зниження ККД і зміну характеристик приводу.

Для побудови системи керування, стійкої до температурних коливань, необхідно враховувати тепловий стан двигуна або постійно вимірювати температуру його основних елементів. Накопичення тепла у статора й ротора спричиняє поступове зміщення робочих характеристик машини, а при тривалій роботі в перевантаженому режимі це може викликати пошкодження ізоляції та навіть міжвиткові замикання.

Також слід враховувати, що температура впливає не лише на електричні параметри, а й на механічну частину системи — підшипники, вал і з’єднання, які при перегріванні можуть деформуватися або змінювати коефіцієнт тертя. Тому контроль температури — це не лише питання енергоефективності, а й безпеки та довговічності роботи всього електроприводу.

Для теоретичного дослідження процесу нагрівання було застосовано спрощену теплову модель двигуна, що враховує основні елементи: обмотку статора, сталеву частину корпусу та навколишнє середовище. Модель базується на розрахунку теплових потоків між цими елементами за допомогою коефіцієнтів теплопередачі. Такий підхід дозволяє оцінити зміну температури у часі без детальної інформації про конструкцію двигуна.

Розрахунки виконувались у програмному середовищі MatLab Simulink, що дало можливість побудувати динамічну модель процесу нагрівання. В результаті встановлено, що при температурі навколишнього повітря 10 °C температура обмоток двигуна досягає приблизно 80–85 °C за 30–35 хвилин роботи. Постійна часу нагрівання становить близько 500 секунд, що підтверджує інерційність теплової системи.

Для перевірки результатів моделювання була створена експериментальна установка на базі мікроконтролера Arduino Uno, яка забезпечує гнучкість і простоту у реалізації різних

алгоритмів керування. У ролі датчиків температури використано цифрові сенсори DS18B20, що працюють за протоколом One-Wire. Такий інтерфейс дозволяє підключати кілька датчиків до однієї лінії зв'язку, спрощуючи конструкцію системи. Один із датчиків закріплювався безпосередньо на статорній обмотці для фіксації зміни температури провідників, другий — на корпусі двигуна, щоб контролювати температуру зовнішніх частин. Такий підхід дозволяє отримати повнішу картину теплового стану машини під час різних режимів роботи. Зібрані дані передавались на персональний комп'ютер через Wi-Fi-модуль, де оброблялись і візуалізувались у програмному середовищі LabVIEW. Це забезпечило зручне відображення поточної температури, побудову графіків у реальному часі та можливість збереження даних для подальшого аналізу. Для досліджень використовувався асинхронний двигун типу T2A80/2 потужністю 1,1 кВт.

Експерименти показали, що температура обмоток суттєво залежить від частоти обертання та навантаження. При номінальній швидкості температура підвищувалася помірно, але при роботі на малих швидкостях і підвищених струмах нагрівання відбувалося значно швидше. Це свідчить про те, що ефективність охолодження двигуна різко знижується при зменшенні швидкості, тому контроль температури стає особливо важливим саме в таких режимах. Система показала високу стабільність вимірювань і швидку реакцію на зміну режимів роботи. Використання цифрових сенсорів дозволило уникнути проблем із електромагнітними перешкодами, характерних для аналогових термоперетворювачів. Такий підхід робить розроблену систему простою, доступною та придатною для практичного використання у лабораторних і промислових умовах.

Висновок. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало, що загальні тенденції процесу нагрівання збігаються, проте існують відхилення у значеннях температур. У реальних умовах температура обмоток зростала швидше, ніж це передбачала математична модель. Це пояснюється тим, що під час експерименту двигун працював при коливаннях навантаження і різних умовах охолодження, які не враховані в спрощеній схемі. Модель дозволяє отримати лише середні значення температури для оцінки теплового стану машини, тоді як у реальному двигуні можуть спостерігатися локальні перегріви окремих ділянок. Саме тому важливо поєднувати розрахунок з безпосереднім вимірюванням температури в процесі роботи. Отримані результати підтвердили ефективність використання цифрових датчиків DS18B20, які забезпечують стабільне вимірювання навіть за наявності електромагнітних завад. Реальний контроль температури дає можливість виконувати параметричну адаптацію системи керування, підтримуючи точність і стабільність електроприводу в динамічних режимах. Таким чином, модель дає змогу прогнозувати тенденції нагрівання, а система контролю — своєчасно реагувати на відхилення температури від норми. Їхнє поєднання створює умови для підвищення надійності та довговічності асинхронного двигуна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pakkiraiah B., Sukumar G.D. (2016). A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45), 1–10. DOI: https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313

2. Babii S. M. Kompiuterna model pidiomnoi lebidky vantazhnoho krana v seredovyshchi Matlab / S. M. Babii, A. M. Ratushna // Zbiór artykułow naukowych. «Inżynieria i technologia. East European Conference» (29.06.2017 – 30.06.2017) – Warszawa : Wydawca : Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2017. – 40 str. – S. 11–13.

УДК 621.316.01

ЕТАПИ Й ЗАКОНИ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ МОДУЛІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@btu.kharkov.ua
Мальцев К. В., магістр, e-mail: kirill_malsev@meta.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Підготовка та проведення перспективних системних заходів з розробки і створення мехатронних модулів вимагає всебічного аналізу тенденцій еволюції автоматичних машин і їхніх компонентів. Це відповідає потребам галузей, орієнтованих на використання модульних технічних систем, як закінчених виробів, так і компонентів обладнання та продукції.

Після винаходу машин одним із постійних напрямів людської діяльності стала розробка автоматичних механізмів, а в подальшому й робототехнічних систем. На межі XXI століття в процесі створення складних машин виникла стійка тенденція інтелектуалізації алгоритміки керування, яка супроводжується мініатюризацією модулів і компонентів технічних засобів. Це тісно взаємопов'язані, як форма та зміст, складники загального процесу розвитку техніки.

Технічна модульна система складається із сукупності взаємопов'язаних елементів, що утворюють конструкції, призначені для виконання однієї або кількох функцій, які необхідні людині або іншим технічним пристроям.

Довготривалий аналіз показує, що найважливішими елементами будь-якої технічної модульної системи є: робочий орган (виконавчий механізм), джерело енергії (привод), трансмісія (передавальний механізм) і орган керування. Очевидно також, що, виконуючи одну й ту саму функцію, технічні модульні системи можуть відрізнятися одна від одної за принципом своєї дії, а отже, і за елементами. Досконале дослідження таких модульних електромеханічних систем відкриває перед науковцями актуальну задачу у світ прогресу робототехніки.

Мета дослідження – дослідження структури модульних робототехнічних систем із регульованим електроприводом.

Основні матеріали досліджень. Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем завершуються переходом на якісно нові види техніки (рис. 1, де над S-подібними еволюційними кривими наведено назви етапів, а під ними – приклади відповідних типів техніки).

Рисунок 1 – Етапи процесу еволюційного розвитку технічних модульних систем.

Загальні закони розвитку техніки будь-якої галузі мають такі положення:

1. Закон прогресивної еволюції техніки. Його суть полягає у тому, що технічний об'єкті з однаковою функцією при перехід від покоління до покоління спричинений усуненням головного дефекту (дефектів), пов'язаних із поліпшенням будь-якого критерію (показника) розвитку за наявності певних техніко-економічних умов. Якщо ж розглядати всі переходи та всю історію конструктивної еволюції певного класу техніки, то можна спостерігати закономірності вичерпання можливостей конструкторсько-технологічних рішень на трьох рівнях.

2. Закон стадійного розвитку технічних модульних систем.

Будь-яка технічна модульна система у своєму розвитку проходить чотири стадії: реалізує тільки функцію обробки предмета праці (технологічна функція); реалізує функцію забезпечення процесу енергією (енергетична функція) поряд із технологічною; реалізує функцію керування процесом, крім технологічної та енергетичної; реалізує функцію планування, виключаючи людину з технологічного процесу, і крім всіх попередніх функцій.

3. Закон розширення безлічі потреб-функцій. За наявності потрібного потенціалу та соціально-економічної доцільності виникла нова потреба, яка задовольняється за допомогою вперше створених технічних модульних систем. При цьому виникає нова функція, яка існує доти, доки її реалізація буде забезпечувати поліпшення життя людей.

4. Закон зростання різноманітності технічних модульних систем. Різноманітність прогресивного розвитку техніки з часом монотонно та прискорено зростає. Це приводить до повного задоволення людських потреб, забезпечення високих темпів продуктивності праці й поліпшення інших критеріїв.

5. Закон зростання складності технічних модульних об’єктів. Складність технічних об’єктів з однаковою функцією в силу дії факторів стадійного розвитку техніки та прогресивної конструктивної еволюції технічних систем від покоління до покоління монотонно та прискорено також зростає.

Модульні робототехнічні макети для дослідження мають у своєму складі електричні двигуни, різноманітні давачі, контролери, компресори (рис. 2, 3). Керування макетами здійснюється від програмованого контролера ROBOTICS TXT, що програмується в середовищі ROBO Pro або мовами C, C++, C# и VB. Контролер працює під керуванням ОС Linux. Оснащений кольоровим сенсорним дисплеєм 2,4 дюйма. Головний процесор ARM Cortex A8 (два ядра, 32 біт, 600 МГц), периферійний — Cortex M3. Універсальні входи: 8 штук (цифрові/аналогові 0-9 В або 0-5 кОм). Лічильні входи: 4 штуки. Підключення до ПК: USB/mini-USB.

Рисунок 2 – 3D робот з вакуумним захватом

Рисунок 3 – 3D робот з механічним захватом

Висновок. Маніпуляторний робот з трьома ступенями руху, оснащений вакуумним пристроєм захоплення, використовується для переміщення різних об'єктів в робочій зоні. До контролера ROBOTICS TXT можна підключати додаткові датчики і виконавчі пристрої: сервомотори, мотор XS, перемикачі, терморезистори, фотодатчики і світлодіоди. Контролер має вбудований динамік. Кілька контролерів можуть бути об'єднані між собою. Це дозволяє збільшувати кількість входів і виходів, тобто розширювати сферу застосування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chioncel, C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. (2015). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. International Conference on Applied Sciences, 1 – 6. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005

2. B. Pakkiraiah, G.D. Sukumar.(2016). A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive. Indian Journal of Science and Technology, 9(45), 1–10. DOI: https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313

УДК 62-83:621.3

АСПЕКТИ СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН МЕТОДОМ СТАНДАРТНИХ ПОЛІНОМІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ МАКСИМАЛЬНОГО ДЕМПФІРУВАННЯ ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ

Задорожня І. М., к.т.н., доц., e-mail: zadorozhnyaya.in@gmail.com
Суботін О. І., магістр, e-mail: alexeysubbotin01@gmail.com
Донбаська державна машинобудівна академія

Актуальність дослідження. Однією з важливих задач проєктування електромеханічних систем (ЕМС) технологічних машин є задача синтезу, що, з одного боку, представляє собою спрямований розрахунок, який має кінцевою метою пошук раціональної структури системи автоматичного керування (САК) та встановлення оптимальних величин параметрів її окремих ланок, з іншого боку, інтерпретується як завдання варіаційного обчислення, коли розглядається побудова САК, в якій за початкових умов функціонування (вплив збурення, обмеження за часом, перешкоди) забезпечується теоретичний мінімум помилки. Сьогодні інженерні рішення з синтезу САК часто обмежуються пошуком оптимуму з позиції певних існуючих умов і заданих вимог (точність, припустимий характеру перехідних процесів (ПП), розмір, надійність), що забезпечать досягнення необхідних характеристик САК [1–3]. Цей підхід часто передбачає використання методів синтезу на основі стандартних характеристичних поліномів, які не враховують особливостей процесів взаємодії механічної та електромагнітної підсистем електроприводу (ЕП), тому необхідність вдосконалення існуючих методів синтезу сучасних систем керування технологічними машинами, що надійно функціонують в змінних режимах роботи та забезпечують формування відповідних динамічних та статичних характеристик системи з урахуванням специфічних властивостей ЕП, зумовило актуальність досліджень.

Мета дослідження – визначення співвідношень для параметрів САК ЕП, що забезпечать формування бажаних динамічних характеристик ЕМС технологічних машин і граничний ступінь демпфірувальної дії ЕП.

Основні матеріали досліджень. Методи синтезу на основі стандартних ХП сьогодні можна вважати класичними. Зокрема, метод стандартних поліномів з бажаною формою перехідних процесів, яка регламентується розподілом коренів ХП (нулів та полюсів передатної функції (ПФ) системи) – Ньютона, Баттерворта, Бесселя, Грехема-Летропа, Соколова, Чебишева, Еллерта передбачає визначення такого ХП, який би забезпечував в системі оптимальні (в розумінні дослідника) ПП, при цьому слід враховувати наступні особливості:

– розподіл коренів по Бесселю відрізняється лінійністю фазочастотної характеристики та забезпечує сталість часу запізнювання і мінімального спотворення сигналу, що проходить через систему;

– розподіл коренів по біному Ньютона забезпечує монотонність тимчасових характеристик для систем будь-якого порядку;

– розподіл коренів по Баттерворту характеризується мінімальною зміною амплітудної частотної характеристики в смузі пропускання і прийнятним загасанням в смузі затримання;

– розподіл коренів по Баттерворту-Томпсону прагне до характеристик, які є «середніми» між розподілами Бесселя і Баттерворта.

При цьому положення на комплексній площині, як нулів, так і полюсів ПФ ЕМС визначаються конкретними параметрами системи – значення коефіцієнтів підсилення, коефіцієнти зворотних зв’язків, параметри регуляторів та об’єкта регулювання, що актуально як для САК ЕП постійного струму, так і для ЕП змінного струму. Також широке застосування для головних приводів прокатних клітей станів знаходить синхронний ЕП з частотним регулюванням. Структура таких ЕП реалізує стратегію підпорядкованого

регулювання із широким діапазоном регулювання та високими динамічними показниками, однак в ЕП металургійних машин застосування синхронних двигунів обмежене надмірним зростанням додаткових динамічних навантажень.

Завдання оптимізації динаміки ЕП із синхронним двигуном за критерієм мінімуму коливальності може бути вирішено також методом синтезу для стандартних форм ХП на основі демпфіруючого ефекту ЕП, який широко використовується на практиці, в якості фактору обмеження динамічних навантажень. Зокрема, для основних ЕП клітей станів гарячої прокатки з двигунами постійного струму зниження коливальності моментів в пружній механічній передачі може бути досягнуто за рахунок формування оптимальної жорсткості механічної характеристики ЕП. Методи оптимізації ЕМС головного приводу клітей станів гарячої прокатки ґрунтуються на посиленні електромеханічного зв'язку, використанні принципу електромеханічної сумісності [4] та синтезі параметрів з метою мінімізації реакції ЕП на дію коливань моменту пружної механічної частини як зовнішнього збурення.

Виконання вимог технологічного процесу різними технологічними машинами металургійного виробництва, обробки металів різанням, підйомно-транспортних операцій, а також безлічі інших припускає використання регульованих ЕП з мінімальним часом ПП і нульовою статичною помилкою регулювання за швидкістю, а з урахуванням наявності пружних ланок в цих системах потрібно забезпечити мінімізацію коливальності основних координат ЕП для відповідності бажаним показникам якості регулювання. При цьому демпфірування пружних коливань в ЕМС досягається в остаточному підсумку вибором оптимального коефіцієнта жорсткості механічної характеристики ЕП.

Аналіз проведених дослідження свідчить про те, що отримані результати дозволяють використовувати метод стандартних ХП для налаштувань САК, проте він має недоліки, оскільки передбачає для забезпечення бажаних показників якості ПП переналаштування системи, яке охоплює не лише параметри системи керування, а й механічної частини ЕП, що є проблематичним в межах необхідності виконання цієї процедури для САК ЕП конкретної технологічної машини з заданими характеристиками.

Висновок. У результаті досліджень з’ясовано, що забезпечення бажаних показників якості САК ЕП технологічних машин не може бути отримано без урахування взаємодії механічної та електромагнітної підсистем ЕП, при цьому оптимальні ПП за визначеним критерієм (мінімум коливальності або максимум демпфірування) можуть бути реалізовані з використанням демфірувальних властивостей ЕП [4]. Зокрема на підставі граничного ступеня демпфірування ЕП пружних механічних коливань можна використовувати співвідношення для оптимізації параметрів ЕМС при астатичному регулюванні, при цьому визначальним є той факт, що гранична ступінь демпфіруючої дії для налаштування САК ЕП визначається коефіцієнтом розподілу інерційних мас, що є визначальним і обмежуючим параметром для методу стандартних форм ХП.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням: навчальний посібник / Марущак Я. Ю. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2005. 208 с

2. Кузнецов Б. І. Проектування багатоканальних систем оптимального керування / Б. І. Кузнецов, Б. В. Новосьолов, І. М. Богаєнко – К.: Техніка, 1993. 245 с.

3. Осичев А. В. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе / А. В. Осичев, В. О. Котляров, В. С. Марков // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Труды конференции / Под общей редакцией В. Б. Клепикова, Л. В. Акимова. – Харьков: Основа. – 1997. – С. 104-109.

4. Задорожня І. М., Задорожній М. О. Оптимізація та взаємозв’язки параметрів двомасових електромеханічних систем [Електронний ресурс] : монографія – Електрон. текст. дані (4,5 Мб). – Краматорськ : ДДМА, 2021.

УДК 621.158.22

ВАЖЛИВІСТЬ ЗАХОДІВ З ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН НА ЗЕРНООЧИСНИХ КОМПЛЕКСАХ

Зражевський І. О., бакалавр, e-mail: zrazevskojvana28@gmail.com
Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. На сільськогосподарських підприємствах для проведення післяжнивної обробки зерна (сушіння, очищення, складування) є зерноток, на яких застосовуються різноманітні самохідні зернозавантажувальники, транспортери, зерноочисні та сушильні комплекси.

Відомо, що небезпечними виробничими факторами на зернотоку є: відкриті рухомі частини машин чи механізмів; підвищена температура поверхні обладнання у зоні обслуговування; наявність на машинах або обладнанні напруги електричного струму через помилки в електросхемах, порушення ізоляції або несправності контурів заземлення; розсипане на поверхні зернотоку зерно, особливо горох; шар зерна, що перевищує зросту людини, у бункерах та завальних ямах, не обладнаних запобіжними ґратами; вуглекислий газ у завальних ямах, що накопичується при зберіганні більше 7 годин зерна підвищеної вологості.

Для запобігання травматизму в подібних ситуаціях необхідно: навчити працівників безпечним технікам праці згідно з інструкціями з охорони праці; не експлуатувати несправні машини та обладнання; не проводити ручне розрівнювання зерна в бункерах; переміщати територією зернотока лише знеструмлені електрифіковані машини [1].

Різноманітність електрифікованих асинхронних машин на зерноочисних комплексах визначає важливість виконання заходів з охорони праці, що призводить до збереження життя робітників.

Мета дослідження – визначення заходів з обслуговування електрифікованого силового обладнання, яке використовується на зерноочисних комплексах.

Основні матеріали досліджень. Кожен зерноочисно-сушильний пункт обладнаний засобами сигналізації і системою блокування на випадок завалів зерна в бункері або випадкового відключення однієї з машин. Прилади дистанційного контролю температури сушіння мають бути справними.

Під час експлуатації механізованих зернотоків велику небезпеку для працюючих становлять норії, приймальні бункери та бункери-накопичувачі. Щоб уберегтися від травм, персонал має бути уважним та виконувати певні правила [1, 2].

У момент очищення норії відключають електродвигун, відкривають люк у черевику норії та вигрібають зерно спеціальним скребком. Технічний догляд за верхньою головкою норії (мастило, натяг ременя, ланцюга, встановлення огорожі) проводять лише зі спеціального майданчика, передбаченого проектом.

Запуск та вимикання агрегату (комплексу), усунення механічних несправностей, а також регулювання повинен виконувати лише механік. Перед запуском обладнання в роботу, розвантаженням автомашин він включає попереджувальний звуковий сигнал, а також стежить за тим, щоб частини повітряно-решітної, що обертаються зерноочисної машини і трієрного блоку були обладнані захисними огорожами. Без огорож працювати на цих машинах заборонено.

Робочим, зайнятим обслуговуванням вентилятора, труб-глушників та розтруба з кришкою централізованої повітряної системи, видають монтажні пояси та взуття з рифленою гумовою підошвою, а для носіння інструментів та металовиробів – спеціальну сумку.

Для безпечного обслуговування верхньої частини обладнання (відцентрово-інерційного відділення, повітроводів та зернопроводів), що знаходиться в машинному залі, застосовують розсувні сходи, які надійно закріплюють на підлозі. Під час роботи агрегату та при його

зупинці забороняється механіку, підсобним та залученим робітникам перебувати всередині бункера, заповненого зерном. Особливо небезпечна присутність людей у бункері при вивантаженні зерна в автомашину, оскільки зерновий потік, що рухається, може швидко засипатись. Щоб цього уникнути, всі травмонебезпечні зони виробничих приміщень та майданчиків (завальні ями, люки бункерів, сходи, переходи) огороджують та позначають сигнальними кольорами та попереджувальними знаками.

Як показують дослідження, навантаження зерна в завальні ями та бункери-накопичувачі, а також його вивантаження механізовані. При цьому зерно вологістю до 25% повинно заповнювати не менше ніж 90% об'єму бункера. Для післязбиральної обробки зерна вологістю до 16% служать механізовані зерноочисні агрегати типу ЗАВ, а вологістю вище 16% – механізовані зерноочисно-сушильні комплекси типу КЗЗ.

Зерноочисні й навіть зерносушильні комплекси часто мають тимчасові електроустановки, які небезпечніші, ніж постійні. При розміщенні електродвигуна на відстані більше 5,0 м від приводного механізму або при їх розміщенні в різних приміщеннях потрібно передбачати можливість зупинки електродвигуна кнопкою або іншим пристроєм, розташованим біля механізму. Для приєднання до низьковольтним повітряним лініям електродвигунів тимчасових установок дозволяється накладати контакти на дроти за допомогою ізолюючих штанг, але це не виключає необхідності мати вимикач біля двигуна.

Джерелами підвищеної небезпеки стають і пересувні машини для післязбиральної обробки зерна, і зернонавантажувач у разі порушення правил їх експлуатації. До 80% всіх електротравм на зернотоках відбувається через пошкодження ізоляції живильного кабелю при його натягу або попаданні під колесо. Переміщати вручну транспортери, зерноочисні машини або електричні зерносушарки можна тільки при відключеній і від'єднанні живильного кабелю від щитка, інакше через надмірне натягування може пошкодитися ізоляція кабелю або обірватися нульова жила.

Перед початком роботи електротехнічний персонал повинен провести вимірювання опорів ізоляції, повторних заземлень нульового дроту та петлі фаза – нуль всього обладнання. Усі ушкодження електроприводів, пульта управління, силової або освітлювальної мережі, що виникають в процесі роботи, усуває тільки електромонтер, який має IV групу з електробезпеки.

Висновок. До обслуговування електрифікованих машин і установок допускають робітників, які мають кваліфікаційну групу І і пройшли інструктаж з електробезпеки на робітником місці. Проведення інструктажу фіксують в журналі з розпискою інструктора та слухача. Робочим, які обслуговують електрифіковані машини, дозволяється включати і відключати їх тільки при допомоги пусковий апаратури. Забороняється самостійно відкривати розподільні щити, знімати запобіжні плакати, кришки комутуючої та захисної апаратури (магнітних пускачів, кнопкових станцій, рубильників, автоматичних вимикачів), ремонтувати електротехнічну частину машини і навіть замінювати лампи, що перегоріли, і запобіжники. Електромонтер з групою не нижче III повинен виконувати технічне обслуговування електродвигунів, освітлювальної арматури, вимикачів, штепсельних з'єднань, захисної та комутуючої апаратури та електропроводки задля збереження життя та здоров’я всього персоналу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / М.Л. Лисиченко, П.І. Савченко, О.К. Тищенко, В.В. Гузенко. — Х: ХНТУСГ; Факт, 2012. – 500 с.

2. Основи охорони праці: підручник / В.Ц. Жидецький. – 3-тє вид., перероб. і доповн. Львів: УАД, 2008. – 336 с.

УДК 621.313

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Корецький А. С., магістр, e-mail: jhopanigera@gmail.com
Турчин В. Т., студентка, e-mail: turchynvicky@gmail.com
Горященко С. Л., к.т.н., доц., e-mail: horiashchenko@khmnu.edu.ua
Хмельницький національний університет

Актуальність дослідження. Необхідність комплексного дослідження як електродвигуна, особливостей виконуваної роботи, так і системи керування з метою оптимального вибору електроприводу конкретної проєктованої побутової техніки. Вагомим також є розробка нових алгоритмів керування, що на нинішній день дозволяє мікропроцесорна техніка шляхом програмування. Тому сьогодні актуальним є розробка автоматизованої системи дослідження електроприводу та алгоритмів керування ним для оптимального застосування його в побутовій техніці. Така система автоматизовано контролює, досліджує та аналізує характеристики електроприводу, або алгоритму його роботи, який випробовується чи досліджується із врахуванням типу електродвигуна.

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи керування та контролю електродвигунів побутової техніки. Система має забезпечувати керування найуживанішими видами електродвигунів за будь-якими алгоритмами їх роботи, що застосовуються в приводі побутових машин та апаратів.

Основні матеріали досліджень. Система складається умовно з окремих блоків, які розрізняються у зв'язку із їх функціональним призначенням, а також вони розташовані на окремих платах. Основним блоком, завдяки якому відбувається взаємодія всіх інших і як результат діяльність всієї системи, є блок керування (БК). Він побудований на 8-розрядному перепрограмованому мікроконтролері ATmega8 фірми Atmel, який володіє 8 кбайт пам'яті програм, 512 байт пам'яті даних, 23 портів вводу-виводу інформації, 6 каналів аналого-цифрового перетворення (АЦП). За допомогою блоку введення інформації (БВв), тобто матричної клавіатури вводиться інформація до БК (вибір програми дослідження, швидкості, тощо). БК згідно раніше запрограмованої керуючої програми подає імпульси керування на блок комутації постійного струму (БКПС), якщо досліджується двигун постійного струму (ДПС), або блок комутації змінного струму (БКЗС), якщо досліджується двигун змінного струму (ДЗС) відповідно.

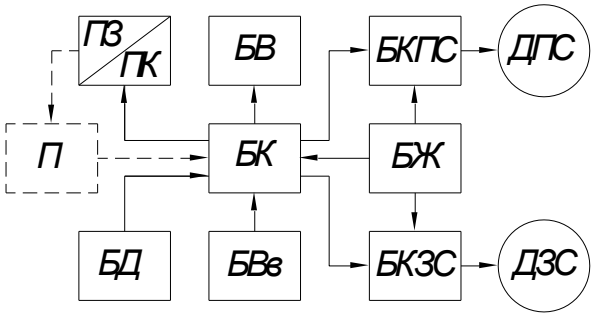


Рисунок 1 – Структурна схема автоматизованої системи керування та контролю електродвигунів

БКПС виконаний у вигляді шести комутаційних ключів на польових транзисторах типу IRLZ34N, які мають низький опір відкритого каналу (близько 0,035 Ом), а отже, малі власні втрати потужності. Внутрішня структура дозволяє виконувати комутацію постійних струмів на рівні 30 А, та витримувати стрибки імпульсів до 100 А при напрузі до 55 В. Виконана гальванічна розв'язка силового кола від керуючого на оптроні типу 1N25. Завдяки цим

ключам БКПС може комутувати від 1 до 6 обмоткових двигунів постійного струму, в тому числі кроковими та вентильними двигунами. Мікроконтролер БК має канали АЦП, що дозволяють зчитувати інформацію, подану в аналоговому вигляді (вимірювання напруги). Це в свою чергу дозволяє вимірювати та аналізувати сигнали зворотного зв'язку, наприклад струму споживання чи напругу на обмотках електродвигуна. Також створено таким чином датчики крутного моменту та частоти обертання валу, вихідною величиною яких є величина напруги та частота імпульсів відповідно. Це все утворює блок датчиків (БД), що забезпечують вимірювання необхідних величин для побудови характеристик (механічних, робочих) електродвигунів.

Гнучку зміну керуючої програми роботи АСККЕ ПТ забезпечує програматор (П) типу Byte Blaster, що перепрограмовує мікроконтролер. Програматор зв'язаний з ПК через LPT-порт. Для програмування застосоване програмне забезпечення Avreal, що дозволяє «зашивати» код програми у шістнадцятковому вигляді за допомогою ПК. Керуюча програма створюється на мові С++ і не є громіздкою. Після компіляції С-програми, створюється шістнадцятковий код, який необхідний для програмування системи. На рис. 2 показано фотографію розробленої установки для керування та контролю електропривода.

Рисунок 2 – Фото автоматизованої системи керування та контролю електродвигунів

Висновок. Розроблена конструкція системи для автоматизованого керування та контролю електродвигунами, а також запропоновано засоби для експерименту – вимірювальні пристрої та датчики (струму, напруги, руху).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Цифрові системи регулювання електроприводу з комбінованим керуванням: автореф. дис. канд. техн. наук: 30.09.1999 / Мінтус А.М.; Донецький державний технічний університет. – Д., 1999. – 14 с.

2. Експериментальна установка для реалізації складних високоточних алгоритмів керування електроприводом змінного струму / І.В. Сметана // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2005. – №5. – С. 22–25.

УДК 621.313.322

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРА В ПУСКОВОМУ РЕЖИМІ СИНХРОННИХ МАШИН

Кучинський К. А., д.т.н., ст. наук. співроб., e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com
Інститут електродинаміки НАН України

Актуальність дослідження. У технологічних процесах безперервних виробництв широке поширення набули швидкохідні неявнополюсні синхронні машини, ротор яких виконаний у вигляді масивної бочки з профрезерованими пазами для укладання обмотки збудження. Вони використовуються як електропривод компресорів, нагнітачів, насосів та інших механізмів, зокрема, в нафтогазовій промисловості [1].

Забезпечення, за технічними умовами, можливості прямого асинхронного пуску від повної напруги мережі, як одного з експлуатаційних режимів машини, супроводжується найбільшими електромагнітними навантаженнями поверхні масиву бочки. З точністю їх визначення безпосередньо пов'язана надійність функціонування машини у загальній системі нафто-газоагрегатів. Крім того, аналіз розподілу локальних електромагнітних навантажень, які залежать від величини ковзання, дозволяє зробити висновок про саму допустимість режиму з точки зору нагрівів елементів ротора.

Мета дослідження. Чисельне моделювання й дослідження розподілу електромагнітних навантажень в елементах різних конструкцій масивних зубчастих роторів у пусковому режимі роботи синхронної машини.

Основні матеріали досліджень. На основі проведеного в [1] аналізу квазістаціонарного магнітного поля при великих ковзаннях для окремих варіантів конструктивного виконання синхронних машин потужністю 12500 кВт, у даній роботі представлені результати досліджень розподілу локальних втрат в роторах розглянутих конструкцій для початкового моменту пуску за допомогою чисельного методу скінченних елементів.

Після вирішення методом Ньютона нелінійного рівняння [1] для визначення вузлових значень векторного магнітного потенціалу (ВМП) по всій досліджуваній області розраховуються питомі втрати у кожному скінченному елементі:

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \gamma_n \cdot \left| \dot{E}_n \right|^2 , \qquad (1)$$

де γ_n – питома електрична провідність матеріалу n-го трикутного елемента; $|\dot{E}_n|$ – модуль вектора електричної напруженості, який визначається за вже відомими з розв'язання системи рівнянь [1] значеннями ВМП A вузлів i, j, m у n-му елементі співвідношенням:

$$\left| \dot{E}_n \right| = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot s \cdot \left| \dot{A}_i + \dot{A}_j + \dot{A}_m \right| , \qquad (2)$$

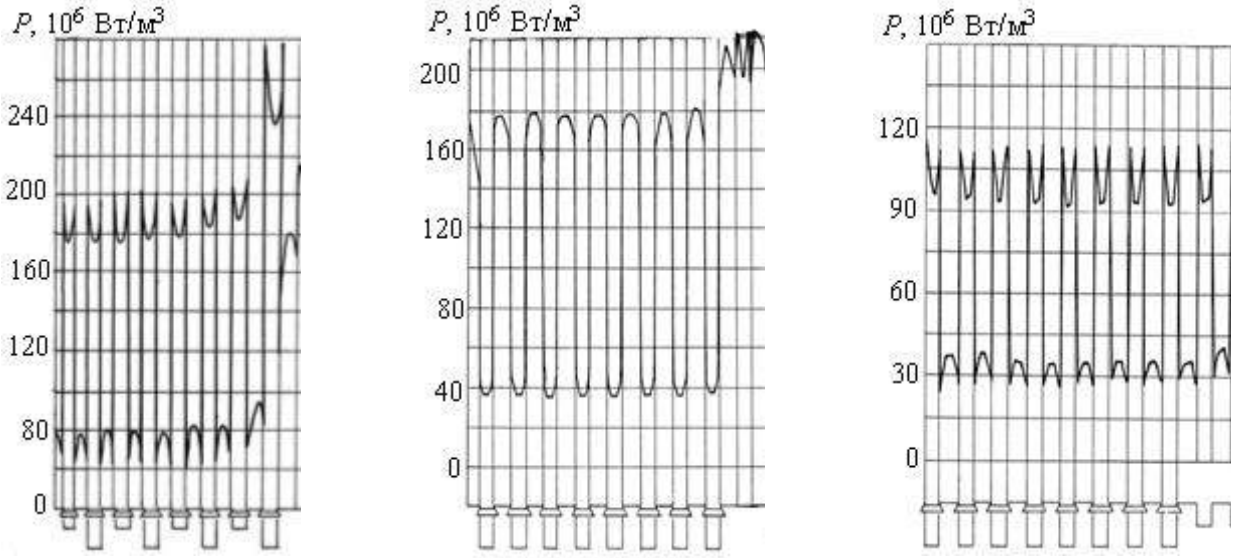
де ω – кутова частота збуджуючих струмів; s – ковзання.

Об'єктами досліджень були машини потужністю 12500 кВт, що застосовуються як привод нагнітачів природного газу в нерегульованому режимі роботи [1]:

1. З неізольованими латунними клинами на роторі.
2. Різного конструктивного виконання роторів підвищеної термостійкості до несинхронних полів із застосуванням пазових клинів з матеріалу із низькою питомою електропровідністю – сплаву титану або клинів з бронзи – із укладеною під ними і в малих пазах на великих зубцях потужною демпферною системою з того самого матеріалу.

При оцінці допустимого навантаження машини й тривалості процесу її пуску обмежуючим фактором є не стільки загальний рівень втрат від вихрових струмів у роторі, скільки особливості їх розподілу та інтенсивність у найбільш навантажених областях, які викликають підвищені місцеві нагріви.

На рис. 1 наведені відповідно розподіли питомих втрат у поверхневому шарі роторів різного виконання на половині їх полюсної поділки для початкового моменту процесу пуску машин (при ковзанні s = 100 %).



а *б* *В*

Рисунок 1 – Розподіл питомих активних втрат у роторах машин при ковзанні s = 100 %: *а* – з латунними клинами; *б* – з титановими; *в* – з бронзовими та демпферною системою

Отримані результати вказують на нерівномірний характер розподілу електромагнітних навантажень в елементах поверхневого шару по окружності ротора. На їх величини суттєво впливають електрофізичні характеристики матеріалу клина, заліза бочки, а також наявність демпферної системи, додаткових пазів у великих зубцях досліджуваних конструкцій. Значення питомих електричних опорів матеріалів пазових клинів (сплавів латуні, титану, бронзи) є одними з головних факторів, від яких залежить розподіл вихрових струмів та втрат між зубцями й клинами.

Основних навантажень у роторі зазнає масив великого зубця. Якщо він екранується демпферною системою (обмоткою або високоелектропровідними клинами), то найбільший струм протікає по зубцевій поділці, найближчій до великого зубця (рис. 1, *а*, *в*), у клині якої виділяються максимальні втрати.

У конструкції з високоомними титановими клинами (рис. 1, *б*) енергія поля в поверхневому шарі виділяється головним чином у великих і малих зубцях. У цьому випадку пазові клини принципово не повинні мати високих перегрівів, що викликаються електромагнітними навантаженнями від вихрових струмів.

Розміщення котушок бронзової демпферної системи в додаткових малих пазах на великих зубцях посилює згасання поля в масиві та призводить до зниження втрат у поверхневому шарі ротора приблизно на 40 % (рис. 1, *в*).

Дослідження локальних втрат у характерних зубцевих поділках показали, що їх зміни у процесі пуску машини носять практично лінійний характер.

Висновок. Детально досліджено вплив основних факторів на величини і характер просторового розподілу електромагнітних навантажень в елементах масивних роторів у короткочасних пускових режимах потужних синхронних машин. Найбільші їх значення отримані в поверхневому шарі конструкцій у початковий момент процесу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кучинський К.А. Вплив конструктивного виконання синхронного двигуна на розподіл магнітного поля в роторі. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р. Держ. біотехнологічний ун-т. Харків, 2024. 312 с. С. 141–142. http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/

УДК 615.831:615.47.125

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ІНКУБАЦІЙНОГО ЯЙЦЯ

Міленін Д. М., к.т.н., доц., e-mail: dm.milenin@gmail.com
Тютюнник В. О., e-mail: vtutunnik@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Птахівництво одна з технічно розвинутих галузей тваринництва. Так, відомо що за даними статистичних розрахунків, для виробництва 1,0 *т* м'яса курчат бройлерів або 1,0 *т* яєчної маси потрібно енергії кормів відповідно у 2,3 та 2,1 рази менше порівняно з яловичиною [1]. Останнім часом сільськогосподарські підприємства використовують в основному інтенсивні технології виробництва, складовими яких є енергоресурсозберігаюче обладнання. Крім того, планується збільшення валового виробництва у 1,6 рази, порівняно з 2016 р. і для повного забезпечення потреб галузі до 2030 р. передбачається збільшення валового виробництва інкубаційних курчат [2]. Зрозуміло, що для досягнення запланованих показників необхідно збільшити поголів'я м'ясо-яєчних курей на 65%, а поголів'я курей несучок вітчизняної селекції до 48,4 *млн гол*. Таким чином, доцільно розробляти і запроваджувати новітні технології і технічні засоби для підвищення ефективності інкубаційного процесу та якості добового молодняку.

Мета дослідження – розробити дослідний зразок конвеєрної установки з удосконаленим приводом обертання яйця при лазерній його обробці та провести вимірювання технічних параметрів.

Основні матеріали досліджень. За основу прийнято установку коли яйце знаходиться нерухомо в горизонтальному положенні нерухомо під лазерним променем, що як показали раніше (2016 р.) проведені експериментальні і промислові дослідження дозволяє зрушити процес розвитку ембріону одночасно для певної партії інкубаційних яєць перед закладенням шафу інкубатора [3].

Для реалізації поставленої мети було проаналізовано наявні конструкції конвеєрних систем інкубаційних ліній і визначено їхні основні недоліки — відсутність рівномірності опромінення та можливість локального перегріву шкаралупи.

В експериментальній установці використовувався напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 650 *нм,* який забезпечує необхідну інтенсивність випромінювання для проникнення крізь шкаралупу яйця.

Однак, проведені в подальшому додаткові дослідження показали що лазерне опромінення не тільки активізує ділення клітин зародку, а й змінює біохімічний склад білка яйця, внаслідок чого хімічні сполуки стають доступніші для подальшого їх споживання ембріоном.

Тому, з огляду на це, пропонується удосконалити раніше розроблену конвеєрну установку, а саме, доповнити електроприводом для поступового обертання вздовж великої вісі умовного еліпсоїда, що описує яйце під лазерним променем (рис. 1).

Механізм обертання реалізовано за допомогою системи натяжних роликів, які синхронізують поступовий рух яйця вздовж конвеєра з його повільним обертанням навколо поздовжньої осі. Така кінематична схема дозволяє рівномірно розподіляти енергію лазерного випромінювання по всій поверхні шкаралупи та уникати перегріву. Оптимальна кутова швидкість обертання становить 0,5–1 *об/с*, що забезпечує ефективне поглинання енергії без негативного впливу на внутрішній вміст яйця.

Таким чином, конвеєрна установка забезпечує переміщення яйця не тільки вздовж горизонтального напрямку, а й здійснює його обертання навколо більшої вісі яйця.

Рисунок 1 – Умови опромінення напівпровідником лазером інкубаційного яйця

Результати дослідження. Попередні експериментальні випробування показали, що при лазерному опроміненні з одночасним обертанням яйця коефіцієнт рівномірності енергетичного навантаження на поверхню шкаралупи підвищується на 18–22% порівняно з нерухомим положенням. Це сприяє більш рівномірному прогріванню білкової частини та покращенню процесів дифузії кисню всередину яйця. За результатами інкубації, виводимість молодняку підвищилася на 4-6%, а показники життєздатності добових курчат на 3–4% порівняно з контрольною групою.

Висновок. Найбільш ефективним виявився варіант конвеєрної установки з удосконаленим електроприводом, який забезпечує синхронне поступальне переміщення та обертання яйця під лазерним променем. Завдяки цьому досягається рівномірне енергетичне навантаження по всій поверхні шкаралупи, покращуються умови розвитку ембріона та підвищується якість інкубаційного матеріалу. Запропонована конструкція може бути рекомендована для промислового використання в інкубаційних цехах птахофабрик як енергоефективний та технологічно надійний засіб передінкубаційної обробки яєць.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стратегія розвитку сільськогосподарського виробництва в Україні на період до 2025 року / За ред. НААН України Я. М. Гадзала, М. І. Бащенка, В. М. Жука, Ю. О. Лупенка. – Київ: Аграр. Наука, 2016. 216 с.

2. Тваринництво України: стан, проблеми, шляхи розвитку (1991-2017-2030 рр.) / за ред. акад. НААН М. І. Бащенка. – Київ: Аграр.наука, 2017. 160 с.

3. Кіпенський А. В. ін. Лазер і здоров'я. / А. В. Кіпенський, Л. Я. Васильева-Лінецька Л.Я., Вуйцік Вайльдемар, Н. І Заболотна, Н. М. Качалова, Л. Г. Коваль, П. Ф. Колісник, О. С Комарова, В. В. Куліченко, М. Л. Лисиченко, З. М. Микитюк, В. С. Павлов, С. В. Павлов, Є. Г. Русанова, Й. Р. Салдан, О. Є Сушинський, С. В. Тимчик, С. Є. Тужанський, В. В. Холін, Д. Х. Штофель // Под ред. А. В. Кіпенського. – Харків: Кумунальне підприємство «Міська друкарня», 2024. 387 с.

УДК 681.513

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІКИ ОПЕРАТОРА БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА В СТОХАСТИЧНИХ УМОВАХ

Осадчий С. І., д.т.н., проф., e-mail: srg2005@ukr.net
Віхрова Л. Г., проф., e-mail: vihrovalg@ukr.net
Каліч В. М., проф., e-mail: vmk041954@gmail.com
Мірошніченко М. С., доц., e-mail: marymir@ukr.net
Центральноукраїнський національний технічний університет

Актуальність дослідження. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) функціонують у складі кіберфізичних систем, де оператор виступає центральним елементом [1, 2]. Його діяльність визначає якість управління польотом, що залежить як від технічних характеристик системи, так і від психофізіологічного стану людини-оператора. Актуальною є задача ідентифікації динамічних моделей оператора та його ремнанти (упередження) у стохастичних умовах дії атмосферних збурень, шумів вимірювань та випадкових впливів [2, 3].

Мета дослідження – розробити метод структурної ідентифікації моделей динаміки оператора та ремнанти, вільний від обмежень традиційних підходів, зокрема припущення про «білий шум» збурень, спрощене представлення оператора як одновимірного об’єкта, ідеалізація сенсорів та гіпотеза про відсутність взаємного впливу сигналів на вході системи.

Основні матеріали досліджень. Архітектура системи управління польотом представлена у вигляді багатовимірної замкненої системи. Для побудови моделі використано основні рівняння вимірювання параметрів польоту та динаміки БПЛА. Моделі пілота Wn(s) та ремнанти Wp(s) описують відповідно реакцію оператора на візуальні сигнали та його додаткові рухи [4]. Запропоновано використовувати статистичні методи динаміки систем управління для визначення частотних характеристик і спектральних щільностей випадкових процесів.

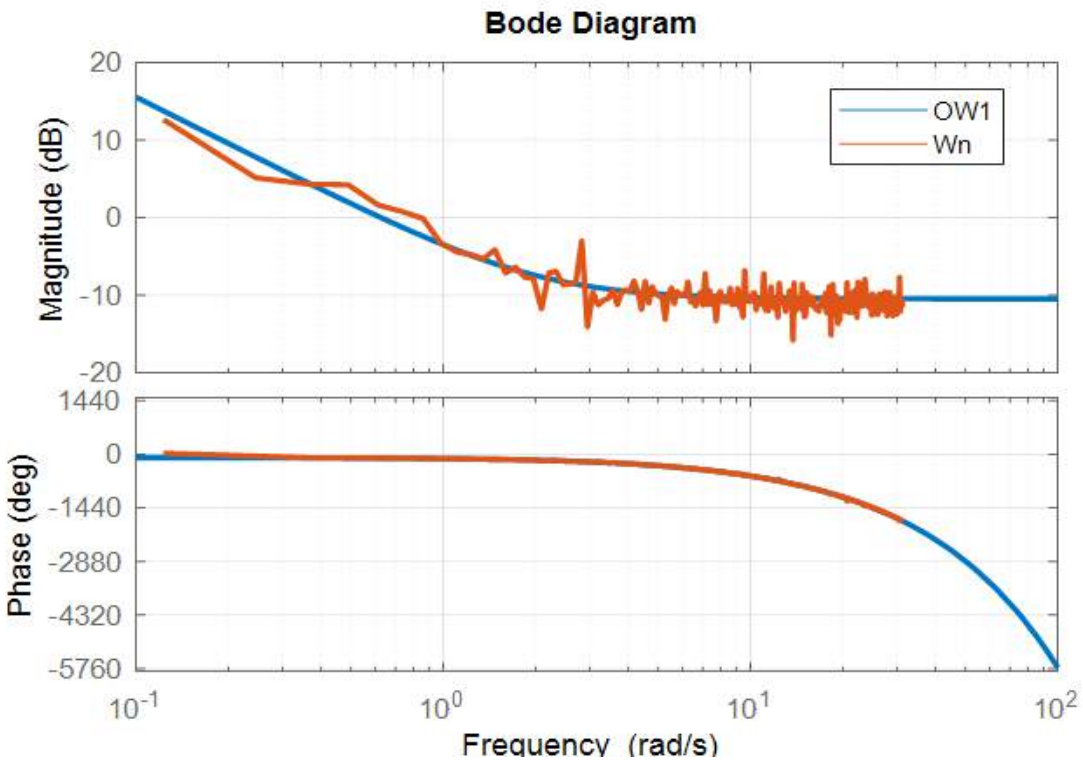


Рисунок 1 – Діаграма Боде передатних функцій об’єкта

Метод випробувано під час моделювання системи стабілізації кута тангажу БПЛА типу «Жайвір» у середовищі Matlab/Simulink [5]. Отримано стохастичні сигнали для програмного завдання польоту, збурень атмосфери, шумів вимірювань та ремнанти пілота. Ідентифікацію виконано за допомогою функції cpsd для оцінки взаємних спектральних щільностей. Порівняння діаграм Боде (рис. 1) істинної та ідентифікованої передатних функцій показало високу точність.

Висновок. 1. Запропоновано нові правила ідентифікації моделей динаміки оператора і ремнанти, які забезпечують коректність у стохастичних умовах.

2. Ідентифікація реалізується стандартними засобами Matlab, що робить метод практично придатним для експериментальних досліджень.

3. Результати створюють основу для синтезу адаптивних людино-машинних систем керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Статистична динаміка систем управління / Блохін Л. М. та ін. Київ: НАУ, 2014. 300 с.

2. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів управління стохастичним рухом об’єктів: монографія / Блохін Л. М., Осадчий С. І., Дідик О. К., Рудюк Г. І. Кіровоград: видавник-Лисенко В. Ф., 2015. – 284 с.

3. Osadchy S. I., Zozulia V. A. “Passive Identification of Multivariable Stabilization System Elements’Dynamics” Automation of Technological and Business Processes. 2020. №12(1). pp. 32-40. https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1701

4. Азарсков В. Н., Блохин Л. Н., Житецкий Л. С., Кусуль Н. Н. Робастные методы оценивания, идентификации и адаптивного управления: Монография. – К.: НАУ,2004. – 500 с.

5. Bai, E.-W.: Frequency domain identification of Wiener models. Automatica. 2003. №39(9). 1521–1530 pp. https://doi.org/10.1016/S0005-1098(03)00149-3.

УДК 621.313:681.518:004.8:620.9

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ НА БАЗІ MICROGRID

Окушко О. В., к.т.н., доц., e-mail: okushko@nubip.edu.ua
Радько І. П., к.т.н., доц., e-mail: radko@nubip.edu.ua
Наливайко В. А., к.т.н., доц, e-mail: nalyvayko@nubip.edu.ua
Сорокін Д. С., к.т.н., доц., e-mail: sorokin@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Актуальність дослідження. Сучасна промисловість перебуває у фазі активної цифровізації та переходу до інтелектуальних енергосистем, де ключову роль відіграють технології Microgrid і Інтернет речей (IoT). Одним із головних напрямів підвищення ефективності енергоспоживання є впровадження систем моніторингу та прогнозування технічного стану електродвигунів малої потужності (до 20 кВт), що становлять основу більшості виробничих і транспортних процесів [1].

Проблема забезпечення надійності роботи електродвигунів залишається актуальною, оскільки більшість систем технічного обслуговування досі базується на планово-попереджувальному принципі, який не враховує реальний стан обладнання. Це призводить до незапланованих простоїв, зниження продуктивності та зростання експлуатаційних витрат.

В умовах розвитку Smart Grid та інтеграції відновлюваних джерел енергії Microgrid дозволяє реалізувати розподілене, автономне керування електроспоживанням і створити середовище для впровадження інтелектуальних систем діагностики [2]. Використання машинного навчання, обробки великих даних і хмарних технологій дає змогу прогнозувати технічний стан двигунів і запобігати відмовам на ранніх етапах [3].

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення енергоефективності, надійності та цифрової інтеграції електроприводів у межах локальних енергетичних систем. Розробка системи моніторингу на базі Microgrid сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, мінімізації аварійних ризиків і підвищенню рівня енергетичної безпеки підприємств, зокрема в галузі ремонту та обслуговування безпілотних літальних апаратів [4].

Метою дослідження є розробка та вдосконалення інтелектуальної системи моніторингу й прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт на базі Microgrid, що використовує сучасні методи аналізу даних, машинного навчання та цифрові технології для підвищення ефективності й надійності експлуатації.

Основні матеріали досліджень. Електродвигуни до 20 кВт є основними споживачами електроенергії на промислових підприємствах. Традиційні системи діагностики ґрунтуються на ручних вимірюваннях різних параметрів (температури, вібрації, електричного струму тощо), що не дозволяє отримувати дані в режимі реальному часі [3].

Сучасні підходи базуються на автоматизованих та інтелектуальних системах моніторингу, що використовують сенсорні мережі, SCADA-платформи та хмарні сервіси. Серед найефективніших методів можна відзначити наступні: MCSA-аналіз (Motor Current Signature Analysis), який дозволяє виявляти електричні і механічні дефекти через гармонічний спектр струму, вібраційна діагностика ґрунтується на контролі розбалансування, дефектів підшипників і ротора, термографія та ІЧ-контроль може визначати зона перегріву обмоток та аналіз енергоспоживання, який виявляє зниження ККД і надлишкові навантаження електродвигунів.

Microgrid – це локальна енергосистема, яка інтегрує споживачів, генератори (ВДЕ), накопичувачі енергії та керуючі пристрої. Її архітектура передбачає локальний контроль через мікроконтролери та центральний контролер, який координує взаємодію із самою мережею [2].

Згідно з нашими дослідженнями Microgrid використовується не лише як енергетична структура, але й як інформаційна платформа для збору різних даних із численних сенсорів, які розміщені на електродвигунах. Внаслідок чого отримана нами система дозволяє здійснювати моніторинг параметрів електродвигуна у режимі реального часу, інтегрувати відновлювані джерела енергії для живлення двигунів, підвищувати стійкість до аварій та збоїв у мережі та реалізовувати енергооптимізоване керування самим навантаженням [2].

Розроблена система використовує IoT-сенсори для вимірювання температури, струму, напруги та вібрацій. Зібрані дані передаються до аналітичного модуля, який працює на базі Big Data та машинного навчання. Програмне забезпечення передбачає візуалізацію даних, генерацію звітів і формування рекомендацій для технічного персоналу. Особливу увагу приділено створенню зручного користувацького інтерфейсу, який дозволяє оперативно реагувати на відхилення параметрів від норми.

Розрахунок економічних показників засвідчує доцільність впровадження системи моніторингу. Основний ефект досягається завдяки зменшенню кількості аварійних ремонтів, продовженню ресурсу електродвигунів на 10–15 %, підвищенню енергоефективності на 5–8 % та скороченню тривалості простоїв виробничих ліній. Окрім цього, впровадження такої системи узгоджується з державними програмами з енергозбереження та цифрової трансформації промисловості.

Висновок. У результаті проведеного дослідження розроблено інтелектуальну систему моніторингу та прогнозування стану електродвигунів до 20 кВт, що функціонує в межах архітектури Microgrid. Запропонована концепція поєднує сенсорні технології, IoT, машинне навчання та хмарні сервіси, забезпечуючи безперервний контроль параметрів роботи та своєчасне виявлення відхилень.

Система дозволяє забезпечити попереджувальне технічне обслуговування замість реактивного, підвищити енергоефективність електроприводів; знизити експлуатаційні витрати та інтегрувати моніторинг у розумні енергомережі майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мірошник О. М., Павленко І. В., Сидоренко П. В. Процеси під час транспортування електричної енергії в електричних мережах та методи підвищення ефективності управління режимами. Харків: ХНТУСГ, 2022.

2. Шевченко І. П., Руденко О. С. Інтелектуальні системи управління в мікромережах енергопостачання. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2022, №4, с. 58–65.

3. Гнатюк С. О., Криворучко В. В. Використання Big Data у прогнозуванні технічного стану електричних машин. *Вісник НТУУ «КПІ». Енергетика*, 2023, №1, с. 45–53.

4. Santos, J. F. D., Tshoombe, B. K., Santos, L. H. B., Araújo, R. C. F., Manito, A. R. A., Fonseca, W. S., Silva, M. O. Digital Twin-Based Monitoring System of Induction Motors Using IoT Sensors and Thermo-Magnetic Finite Element Analysis. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 1682–1693. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3232063

УДК 621.316.929

АРХІТЕКТУРА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Попова І. О., доц., e-mail: etem@tsatu.edu.ua
Чаусов С. В., доц., e-mail: etem@tsatu.edu.ua
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність дослідження. Під час експлуатації двигунів в мовах агропромислового комплексу кожен рік з ладу виходить до чверті асинхронних двигунів (АД) від наявного парку, тому що в процесі роботи АД мають місце різні експлуатаційні фактори або їх комбінація, які не були враховані виробником, що можуть привести до їх передчасного виходу з ладу. Найбільш уразливим елементом конструкції електродвигуна є його обмотка взагалі, і зокрема її ізоляція. Якщо за базовий прийняти термін служби ізоляції, що гарантується виробником, то він може бути спрацьований за значно менший час. На швидкість зносу ізоляції впливає ряд чинників, врешті-решт основна їх частина веде до збільшення температури обмотки та погіршення її ізоляційних властивостей.

До особливостей експлуатації слід віднести перевантаження асинхронного двигуна за струмом, а до специфічних умов експлуатації – віднести низьку якість електроенергії, зокрема несиметрію напруги мережі. На стабільність і, особливо, симетричність напруги трифазної мережі впливає відносно велика довжина ліній електропередачі і змішане підключення трифазних і однофазних споживачів. Несиметрична система напруги на затискачах асинхронного двигуна призводить до виникнення напруги зміщення нейтралі, що викликає несиметрію фазних струмів, наслідком чого є збільшення фазних струмів. Такі експлуатаційні особливості створюють значні ускладнення при роботі асинхронних двигунів і, особливо, при виборі пристроїв діагностування їхніх режимів роботи й захисти від аварійних режимів [1]. Головна причина виходу асинхронних електродвигунів, в переважній більшості випадків, є пошкодження їх обмотки статора, руйнування ізоляції статорних обмоток через перегрів. Тому розробка і удосконалення пристроїв захисту від аварійного режиму роботи асинхронного двигуна є одним з шляхів вирішення проблеми їх експлуатаційної надійності.

Висока аварійність асинхронних електродвигунів обумовлює необхідність вдосконалення існуючих або розробки нових засобів діагностика і захисту їх від аварійних режимів роботи на базі сучасної мікропроцесорної техніки

Мета дослідження – розробити структурну схему пристрою захисту асинхронного двигуна від несиметрії напруг мережі, обриву фаз та перевищення температури ізоляції обмоток вище граничного значення для його класу ізоляції.

Основні матеріали досліджень. З метою підвищення експлуатаційної надійності АД з короткозамкненим ротором і їх ресурсозбереження, зменшення втрат активної потужності в обмотках статора розроблена структурна схема пристрою захисту АД при несиметрії напруги сільської мережі та при збільшенні температури статорної обмотки асинхронного двигуна відносно номінальної температури в наслідок тривалого перевантаження за струмом на базі сучасної цифрової мікросхемотехніки.

Пристрій захисту АД повинен забезпечувати виконання наступних умов [1, 2]:

- здійснення контролю напруги фаз A, B, C, а при відхиленні фазної напруги (перекосі фаз) в межах 19–250 В відключати його від електричної мережі;
- здійснення контролю лінійної напруги A-B, B-C, C-A, при відхиленні більш ніж на ±30 В відключати його від електричної мережі;
- здійснення контролю температури статорної обмотки, при перевищенні гранично допустимого значення для класу ізоляції АД (наприклад, 115 ^{o}C) відключати його від електричної мережі;

- світлова сигналізація виникаючих аварійних ситуацій: відхилення напруги, обрив фази або перевищення температури обмотки статора граничнодопустимого для класу ізоляції АД. Структурна схема (рис. 1) складається з наступних блоків: 1.1, 1.2, 1.3 – блок випрямлення напруги фаз А. В. С; 2.1, 2.2, 2.3 – блоки дільників напруги фаз А. В. С; 3.1, 3.2, 3.3 – згладжуючі фільтри; 4 – первинний перетворювач температури фаз; 5 – датчик температури; 6 – блок підстроювання; 7 – мікроконтролер; 8 – блок світлової індикації напруги і температури; 9 – гальванічна розв'язка кіл; 10 – виконавчий орган; 11 – блок живлення мікросхем пристрою захисту.

Виміряна напруга фазах А, В, С АД спочатку випрямляється блоком випрямлення 1.1, 1.2, 1.3, потім знижується за допомогою дільників напруги (блок 2.1, 2.2, 2.3). Згладжуючим конденсаторним фільтром (блок 3.1, 3.2, 3.3) прибираються вищі гармоніки напруги. Напруги далі поступають на мікроконтролер типу PIC16F676, де відбуваються порівняння напруги згідно алгоритму. Блок світлової сигналізації 8 спрацьовую в разі аварійної ситуації (відсутності напруги на фазі АД або невідповідності напруги заданим граничним значенням, тощо). На виході МК через гальванічну розв'язку кіл 9, виконану на оптосимістрі, включається виконавчий орган 11. Його контакти включають і відключають АД від трифазної мережі живлення. В схемі необхідно передбачити кнопку «Скидання» для пере запуску МК і включення АД після усунення аварійної ситуації.

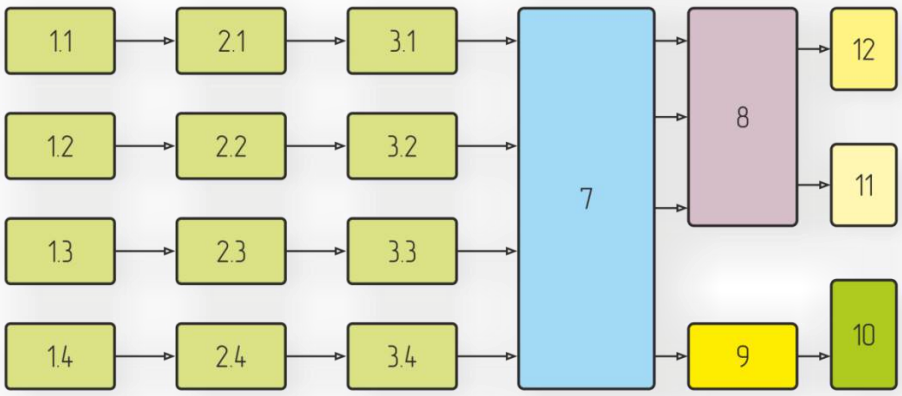


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою захисту

Для контролю температури фаз АД передбачений мікроконтролерний датчик температури 5, які вбудовані в обмотки. Для настройки величини температури фази, що контролюється, передбачений блок підстроювання 7. Пристрій побудований на мікроконтролері (МК) PIC16F676 і цифровому вимірювальному перетворювачі температури DS1820 [1].

Висновок. Розроблений пристрій захисний пристрій з використанням сучасної апаратної бази та наведених теоретичних досліджень дозволить збільшити строк службі асинхронного електродвигуна при виникненні несиметрії напруги, в разі неповнофазних режимів його роботи, зворотному чергуванні фаз, а також перевантаженні за струмом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Попова І. О., Чаусов С. В. Підвищення точності роботи мікропроцесорного пристрою захисту асинхронного двигуна / Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13, том 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-33

2. Попова І. О., Чаусов С. В. Пристрій для моніторингу режиму роботи асинхронного двигуна: *Modern methods for the development of science* / The I International Scientific and Practical Conference, January 09 – 11, Haifa, Israel. С. 361-365. URL: https://eu-conf.com/ua/events/modern-methods-for-the-development-ofscience/.

УДК 621.316.929

СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ РОБОТИ ЗАХИСНОГО ПРИСТРОЮ

Попова І. О., доц., e-mail: etem@tsatu.edu.ua
Чаусов С. В., доц., e-mail: etem@tsatu.edu.ua
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Актуальність дослідження. Швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна в сталому режимі роботи залежить від несиметрії напруги мережі, технічних даних АД і робочої машини, коефіцієнта завантаження робочої машини, виду її механічної характеристики, температури навколишнього середовища [1].

Мета дослідження – розробити алгоритм роботи пристрою контролю та захисту асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Основні матеріали досліджень. При розробці слід передбачити, що пристрій захисту буде відключати двигун від мережі при обриві фази, відхиленні фазної напруги (перекосі фаз) більш ніж на ±30 В і нагріві обмотки статора більше ніж 115℃ (за умови застосування класу ізоляції F). Захисний пристрій доцільно реалізувати на базі мікроконтролери із застосуванням цифрового вимірювального перетворювача температури. Виникнення аварійних режимів в кожній фазі і перевищення температури обмотки двигуна повинна супроводжуватись включенням відповідних сигнальних світло діодів, і за необхідності, відключенням двигуна. Для покращення вимірювання значень напруги передбачається прецизійне джерело опорної напруги, для забезпечення точності перетворення аналогових даних у цифрові. Для вимірювання і порівняння використовуємо випрямлену напругу фаз відносно нульового проводу. Для живлення МК і інших мікросхем використане без трансформаторне джерело живлення. Для відключення АД від мережі в разі аварійного режиму передбачаємо проміжне реле, що приєднане до вихідних портів мікроконтролера через пристрої гальванічної розв’язки.

Розроблена блок-схема алгоритму функціонування, яка представлена на рисунку 1. Алгоритм роботи пристрою захисту наступний. Після включення МК виконується ініціалізація його регістрів і включається керуючий вихід. Після чого проводиться зчитування значення опорної напруги. Під час пуску двигуна або групи двигунів, можливі провали або стрибки напруги в фазах, що обумовлені пусковими струмами, тому пристрій захисту по напрузі починає працювати через одну хвилину після включення двигуна. Затримка реалізована шляхом послідовного включення таймера МК і двох дільників, кожний з яких має коефіцієнт ділення, наприклад, 30.

Далі послідовно виконується вимір напруги фаз А, В, С. Після кожного виміру фаза перевіряється на обрив. Якщо виміряна напруга дорівнює нулю, тоді вихід зразу відключається. Потім слідує перевірка величини виміряної напруги у фазі на вихід за межі діапазону (діапазон в межах 190–250 В). Якщо величина визначеної напруги вийшла за діапазон 190–250 В, то включається лічильник помилок, який необхідний для підвищення завадостійкості пристрою. При декрементуванні восьмирозрядного лічильника від нуля до нуля його коефіцієнт ділення дорівнює 256. Якщо в середньому період проходження всієї програми 7 мс, час затримки вимикання двигуна приблизно 1,8 с. Для кожного порівняння напруги має місце свій автономний лічильник, якщо наступне вимірювання напруги прийде до норми, тоді даний лічильник обнуляється. Після порівняння лінійної (міжфазної) напруги А-В, В-С, С-А, їх різниця перевіряється на перевищення заданого граничного значення (±30В). Якщо несиметрія між лінійними напругами перевищує задане граничне значення (±30 В), тоді включається лічильник помилок. Вимикання виходу відбувається за алгоритмом аналогічно описаному вище, через 1,8 с. При вимиканні виходу встановлюється ідентифікатор помилки, який вимикається тільки після перезапуску МК кнопкою «Reset». При відсутності помилки підтверджується включення виходу і МК переходить до блоку вимірювання температури електродвигуна [2].

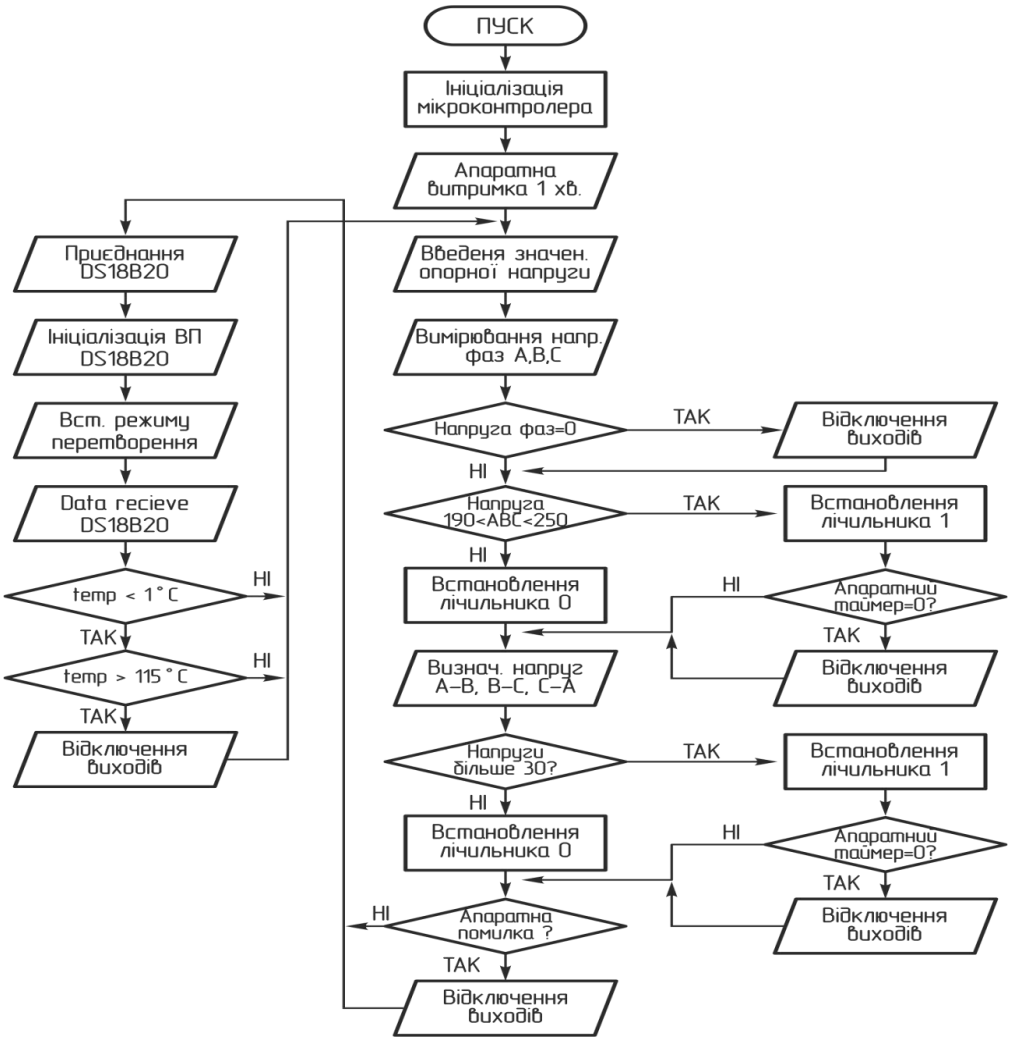


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму роботи пристрою захисту

Вимірювання температури починається з ініціалізації вимірювального перетворювача температури і видачі команди дозволу перетворення. Після прийому даних від датчика температури, впродовж однієї секунди секунд, введена затримка часу початку порівняння. Після відпрацювання часу затримки, встановлюється ідентифікатор «однієї секунди», і кожне наступне вимірювання перевіряється на задане граничне перевищення температури ізоляції обмотки. Якщо температура перевищує граничне перевищення температури ізоляції, вихід виключається. Програма переходить до нового циклу вимірювання напруги по фазах.

Висновок. Наведений алгоритм дозволяє побудувати захисний пристрій на базі сучасної цифрової мікросхемотехніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Попова І. О., Чаусов С. В. Підвищення точності роботи мікропроцесорного пристрою захисту асинхронного двигуна / Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Мелітополь: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13, том 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-33

2. Попова І. О., Чаусов С. В. Пристрій для моніторингу режиму роботи асинхронного двигуна: *Modern methods for the development of science* / The I International Scientific and Practical Conference, January 09 – 11, Haifa, Israel. С. 361-365. URL: https://eu-conf.com/ua/events/modern-methods-for-the-development-ofscience/

УДК 621.124.05

ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОКАРІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Саєнко Є. М., бакалавр, e-mail: eugensaenko14@gmail.com
Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасне сільське господарство потребує ефективних, екологічно безпечних і економічних засобів пересування та техніки. Одним із перспективних напрямів розвитку є застосування електромашин — техніки, що працює на електричній тязі. Використання електричних двигунів у сільському господарстві дозволяє значно зменшити викиди шкідливих речовин, знизити рівень шуму, а також скоротити витрати на технічне обслуговування. Основною перевагою електромашин є екологічність, адже під час роботи електродвигуни не виділяють вихлопних газів, що позитивно впливає на стан атмосфери, особливо під час роботи поблизу населених пунктів або теплиць. Ще одна важлива актуальна перевага — високий крутний момент на низьких обертах, що є ідеальним для сільськогосподарських умов, де техніка часто працює на малих швидкостях, але з великим навантаженням (наприклад, під час буксирування причепів, перевезення врожаю чи добрив).

Мета дослідження – дослідження використання електромобілів у сільському господарстві.

Основні матеріали досліджень. У сучасному фермерстві дедалі більшої популярності набуває електрична логістика на полях. Електровантажівки, електрокари та невеликі трактори на акумуляторній тязі використовуються для перевезення врожаю, доставки насіння, пального, запчастин, транспортування працівників між ділянками. Такі машини не забруднюють повітря, а низький рівень шуму не турбує працівників і тварин. Сучасні електромобілі мають запас ходу від 200 до 400 км на одному заряді, що повністю покриває добові потреби агрологістики. У сільськогосподарських електромашинах застосовуються двигуни змінного струму (AC) або постійного струму (DC), найчастіше асинхронні трифазні двигуни або синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM). Основні технічні характеристики сучасних електродвигунів: Потужність: 30–150 кВт; Крутний момент: 300–1500 Н·м; ККД: до 95–97%; Живлення: від літій-іонних акумуляторів напругою 400–800 В; Маса двигуна: 80–150 кг. Батареї сучасних електромашин мають ресурс до 200 000 км або 8–10 років роботи. Найпоширеніші типи батарей — Li-ion та LiFePO, що забезпечують стабільну роботу при високих температурах. Попри вищу початкову вартість, експлуатація електромашин є вигіднішою. Витрати на електроенергію у 4–5 разів нижчі, ніж на дизельне пальне. Фермерські господарства, які вже впроваджують електромашини, відзначають зниження собівартості перевезень до 40% та покращення умов праці персоналу.

Недоліки електромобіля:

1. Акумулятори швидко виходять з ладу.
2. Акумулятори не володіють тією потужністю двигунів, яка властива звичайним автомобілям.
3. Дорожнеча високоенергомістких акумуляторів через застосування дорогих металів. До того ж вони працюють при дуже високих температурах.
4. Велика втрата енергії акумуляторами при різких стартах і не постійних швидкостях.
5. Проблема виробництва та утилізації акумуляторів, що містять отруйні елементи.
6. При поширенні електромобілів необхідно створення відповідної інфраструктури і підготовки кваліфікованого персоналу для їх обслуговування.

Завдяки досягненням науки і техніки недоліки вдається усунути. Сучасні батареї гарантують пробіг автомобіля до 200 тис. км, а це пробіг до капітального ремонту двигуна на 99% бензинових автомобілів [1]. Сучасним електроавтомобілям присутня висока динаміка. Електрична тяга електромоторів не поступається ДВЗ. Завдяки сучасній промисловості вартість акумуляторів скорочується на 20...30 відсотків кожні 1...2 роки. Батареї li-ion 3-го

покоління при пошкодженні не нагріваються вище 60 градусів, не горять і не вибухають, заряджаються від домашньої мережі, але для цього потрібно більше часу [2]. Обслуговування електромобілів та сервіс надаються дилерами, які приймають в утилізацію і роблять знижку на нові батареї.

Бурхливий розвиток технологій, прискорять широке застосування електричного транспорту, тому що багато міст задихаються від смогу вихлопних газів. Транспорт на електричній тязі, персональні електромобілі, мототехніка, це реальність, яка втілюється на наших очах. З вищесказаного можна зробити висновок, що в даний час є великі перспективи для широкого застосування електромобілів і у сільському господарстві.

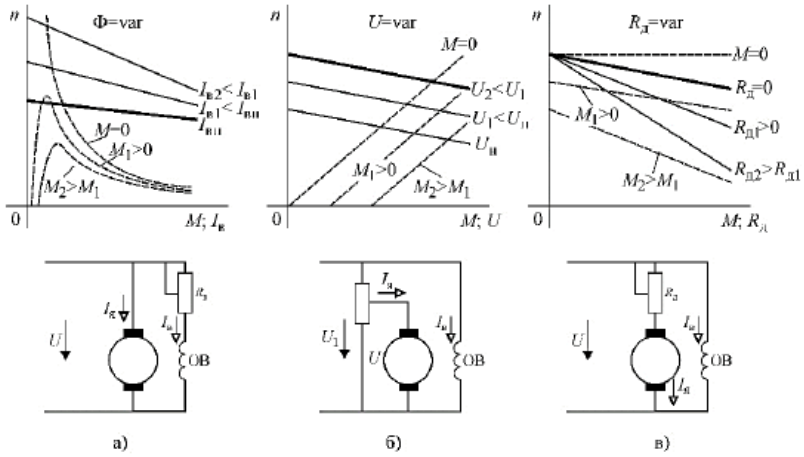


Рисунок 1 – Електричні схеми ДПС та регулювальні характеристики

Аналізуючи рівняння механічних характеристик ДПС (двигунів постійного струму) (рис. 1), що використовуються на електрокарах видно, що вони відповідають основному рівнянню, так як між потоком Ф, напругою живлення U, і моментом М немає додаткових зв'язків. Таким чином, швидкість холостого ходу визначається тільки величиною магнітного потоку і напругою живлення, а жорсткість характеристик – опором кола якоря і магнітним потоком. При номінальному потоці і відсутності додаткового опору в колі якоря, жорсткість характеристики двигуна паралельного збудження висока і відхилення швидкості від швидкості холостого ходу при номінальному моменті складає 2–8%. Двигуни з такою жорсткою характеристикою можуть використовуватись в приводі, де вимагається, щоб швидкість обертання при зміні навантаження залишалась практично постійною.

Висновок. Використання електромашин у сільському господарстві — це реальний крок до екологічно чистого, економічного та сучасного агровиробництва. Електричні двигуни ідеально підходять для польової логістики, де потрібна висока тяга, маневреність і мінімальні витрати.

Розвиток акумуляторних технологій і зниження вартості електротранспорту створюють усі передумови для масового впровадження електромашин на сільськогосподарських підприємствах України.

Довгий термін служби: електрокари мають значно більший термін служби порівняно з традиційними автомобілями, що дозволяє сільським господарям зберігати техніку протягом тривалого часу без потреби в частій заміні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Anegawa, T. "Safety Design of CHAdeMO Quick Charging System, World Electric Vehicle Journal, vol. 4, 2

2. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / М. Л. Лисиченко, П. І. Савченко, О. К. Тищенко, В. В. Гузенко. — Х: ХНТУСГ; Факт, 2012. – 500 с.

УДК 615.831:615.47.125

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОЇ УСТАНОВКИ У СВИНАРНИКУ

Семенов О. О., асп., e-mail: fanfan777@ukr.net
Лисиченко М. Л., д.т.н., проф., e-mail: 1prlysychenko@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Відомо, що свинина в Україні, як повноцінний продукт харчування, у м'ясній частині раціону займає близько 40 %. Однак, в останні роки споживання свинини з субпродуктами та жирами на душу населення складає лише 15–18 *кг*, що значно менше у порівнянні з країнами ЄС де споживають 35–37 *кг*. Тому, планується збільшити поголів'я свиней від 6,7 до 11,7 *млн гол*. у 2020 р. до 22,0 *млн гол*. у 2030 р., що як очікується дозволить збільшити виробництво свинини у живій масі від 1,46 *млн т* у 2020 р. до 12,0 *млн т* у 2030 р., в тому числі передбачається збільшити чисельність молодняку для відгодівлі. Подальший розвиток свинарства пов'язаний із запровадженням сучасного уніфікованого технологічного обладнання, здатного забезпечити комфортні умови утримання тварин і удосконалення систем організації та ведення племінної справи [1].

Одним із можливих напрямків із реалізації поставленої задачі можна вважати застосування удосконалених ультрафіолетових опромінювальних установок в свинарниках маточниках для підвищення ефективності вирощування молодняку свиней [2].

Мета дослідження. Експериментальні випробування ультрафіолетової установки в свинарнику маточнику з використанням джерела ультрафіолетового випромінювання компанії *Philips*.

Основні матеріали досліджень. Ефективність застосування оптичного випромінювання ультрафіолетового діапазону залежить від спектрального складу випромінювання, так випромінювання області *A* – позитивно впливає на тварин та птицю, області *B* – викликає почервоніння їх покривних тканин і викликає генерацію в них вітаміну *D*, області С – має бактерицидну дію, причому, максимальна позитивна дія лежить в діапазоні 280–320 *нм*. Для генерації випромінювання в Україні раніше були розроблені і використовувались розрядні лампи високого тиску типу ДРТ і низького тиску типу ЛЄР-40 [3]. Однак, в останні роки випуск їх значно скоротилось або припинилось зовсім, що і призвело до того, що в промисловому свинарстві ультрафіолетові установки майже не використовуються, як це було в період 2000–2010 рр.

За кордоном електротехнічна промисловість випускає лампи, які генерують випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні, однак конкретні рекомендації щодо їх використання відсутні.

За основу, для побудови ультрафіолетової опромінювальної установки в свинарнику-маточнику, було використано розрядні лампи низького тиску типу виробництва компанії *Philips*, яка має спектр випромінювання в діапазоні 320-405 *нм* з максимумом на довжині хвилі 365 *нм*. На основі договору про творче співробітництво ТОВ «Харківська інженерна компанія» розробила ультрафіолетові опромінювачі (рис. 1а), які були встановлені в приміщенні свинарника-маточника ТОВ «Вербів» Тернопільської області (рис. 1б).

В господарстві одним із напрямків діяльності є розведення молодняку свиней і їх вирощування та відгодівля до товарної ваги, використовуючи власну кормову базу. Свинарник-маточник, побудований більше 20 років тому, має стандарті розміри 12х120х3,5 м і має стаціонарні станки для свиноматок з відділеннями для поросят, які виконані із дерева і в них застосовують підстилку із соломи або сіна (рис. 1б).

Експериментальні випробування розробленої ультрафіолетової установки проводились протягом 7 місяців осінньо-зимового періоду з 1 вересня 2024 р. до 1 квітня 2025 р. Тварин відібрали приблизного одного віку і ваги, розмістили їх в приміщенні, поділивши їх порівно

на дві групи: експериментальна – де розмістили ультрафіолетові опромінювачі; контрольна – де не застосовували опромінювачі.

Параметри мікроклімату (температура, вологість, запиленість, загазованість, ін.), умови ветеринарного обслуговування, раціони годування були однакові. Протягом експерименту після опоросу свиноматок кожного тижня проводили огляд народжених поросят ветлікарем і зважування [4].

По завершенню експерименту було встановлено, що в дослідній групі набір живої ваги народженими поросятами фіксувалась на 12–24 % більша, а респіраторні захворювання майже не фіксувались.

а б

Рисунок 1 – Розміщення ультрафіолетової установки в свинарнику-маточнику

Висновок. Таким чином, застосування розробленої ультрафіолетової установки в свинарнику-маточнику забезпечує комфортні умови утримання молодняку свиней, що практично припиняються респіраторні захворювання в холодний період року та сприяє більш активному набору живої ваги.

Тобто, розрядні лампи низького тиску компанії *Philips* з випромінюванням в діапазоні 320-405 *нм* та максимумом на довжині хвилі 365 *нм* може бути рекомендовано для використання в промислових умовах свинокомплексів України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тваринництво України: стан, проблеми, шляхи розвитку (1991-2017-2030 рр.) / за ред. акад. НААН М. І. Бащенка - Київ: Аграр.наука, 2017. 160 с.

2. Червінський Л. С. Оптичні технології в тваринництві. - Київ: Наука думка, 2003. 230 с.

3. Кушлик Р. В., ін. Електричне освітлення та опромінення. / Р. В. Кушлик, В. Ф. Яковлев, Ю. М. Куценко, М. Л. Лисиченко, М. П. Кунденко, Ю. М. Федюшко. - Харків: ТОВ «Планета-прінт», 2016. 332 с.

4. Васильєв С. І. Технологія виробництва продукції тваринництва: навчальний посібник. - Харків: Вид-во Навчально-методичного центру заочного навчання с.г. вузів України. 1998. 431 с.

УДК 621.327.539

ЗМІНА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ ПРИ ВІДХИЛЕННІ НАПРУГИ

Синявський О. Ю., к.т.н., доц., e-mail: sinyavsky2008@ukr.net
Савченко В. В., к.т.н., доц., e-mail: vit1986@ua.fm
Ковальчук С. М., студент магістратури
Сташко Н. М., студент магістратури
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Актуальність дослідження. Серед двигунів постійного струму двигуни постійного струму послідовного збудження набули найбільшого поширення. Завдяки тому, що вони мають значну перевантажувальну здатність, ці електродвигуни застосовують у мобільних машинах. Відхилення напруги від нормованих значень в електроприводах постійного струму викликає негативні наслідки [1], серед яких найсуттєвішими є порушення нормального ходу технологічних процесів, випуск неякісної продукції, скорочення строку служби електрообладнання та зростання втрат електроенергії.

Мета дослідження – встановити вплив відхилення напруги на кутову швидкість двигуна постійного струму послідовного збудження.

Основні матеріали досліджень. Криву намагнічування двигуна постійного струму незалежного збудження ділять на дві ділянки [2]. При ненасиченій магнітній системі магнітний потік прямо пропорційний струму якоря:

$$\Phi = k_{\Phi} I_{я}, \tag{1}$$

де Φ – магнітний потік, Вб; k_{Φ} – коефіцієнт пропорційності, Вб/А; $I_{я}$ – струм якоря, А.

При насиченій магнітній системі магнітний потік приймається незмінним:

$$\Phi=\Phi_{нас}, \tag{2}$$

де $\Phi_{нас}$ – магнітний потік двигуна при насиченій магнітній системі.

Рівняння механічної характеристики електродвигуна постійного струму послідовного збудження при ненасиченій магнітній системі має вигляд [2]:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}M}} - \frac{R_{дв}}{kk_{\Phi}}, \tag{3}$$

а при насиченій

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{дв}}{k^2\Phi_{нас}^2}M. \tag{4}$$

Закон зміни кутової швидкості двигуна постійного струму послідовного збудження при зміні напруги визначається механічною характеристикою робочої машини:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0)\left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^x, \tag{5}$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини при заданій кутовій швидкості; M_0 – початковий момент; $M_{сн}$ – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості; ω і $\omega_н$ – задане і номінальне значення кутової швидкості; x – показник степеню.

В усталеному режимі роботи $M_д=M_c$.

Тоді при ненасиченій магнітній системі, якщо знехтувати початковим моментом, отримаємо:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}(\omega/\omega_н)^x}} - \frac{R_{дв}}{kk_{\Phi}}. \tag{6}$$

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, закон зміни кутової швидкості (4) запишеться у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}}} - \frac{R_{дв}}{kk_{\Phi}}. \tag{7}$$

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}(\omega/\omega_{н})}} - \frac{R_{дв}}{kk_{\Phi}}. \quad (8)$$

Для робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою (x=2) закон зміни кутової швидкості описується рівнянням:

$$\omega = \frac{U\omega_{н}}{\omega\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}}} - \frac{R_{дв}}{kk_{\Phi}}. \quad (9)$$

Для робочих машин з гіперболічною механічною характеристикою (x=-1), закон зміни кутової швидкості прийме вигляд:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{kk_{\Phi}M_{сн}(\omega_{н}/\omega)}} - \frac{R_{дв}}{kk_{\Phi}}. \quad (10)$$

Коли магнітна система насичена, якщо знехтувати початковим моментом робочої машини M_0, отримаємо:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{дв}M_{сн}\omega^{x}}{k^{2}\Phi_{нас}^{2}\omega_{н}^{x}}^{x}. \quad (11)$$

Для робочих машин, в яких момент статичних опорів не залежить від кутової швидкості, закон зміни кутової швидкості запишеться у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{дв}M_{сн}}{k^{2}\Phi_{нас}^{2}}. \quad (12)$$

Для робочих машин, в яких момент статичних опорів лінійно залежить від кутової швидкості:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{дв}M_{сн}\omega}{k^{2}\Phi_{нас}^{2}\omega_{н}},. \quad (13)$$

Для робочих машин з вентиляторною механічною характеристикою закон зміни кутової швидкості описується рівнянням:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{дв}M_{сн}\omega^{2}}{k^{2}\Phi_{нас}^{2}\omega_{н}^{2}}. \quad (14)$$

Для робочих машин, у яких момент статичних опорів гіперболічно залежить від кутової швидкості, закон зміни кутової швидкості прийме вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_{нас}} - \frac{R_{дв}M_{сн}\omega_{н}}{k^{2}\Phi_{нас}^{2}\omega}. \quad (15)$$

Висновок. Проведені дослідження показали, що відхилення напруги істотно впливає на механічні характеристики електродвигунів постійного струму послідовного збудження.

При зниженні напруги зменшується кутова швидкість, а жорсткість механічної характеристики залишається незмінною.

Закон зміни кутової швидкості електропривода при відхиленні живлячої напруги визначається механічною характеристикою робочої машини. Для робочих машин, у яких момент статичних опорів не залежить або лінійно залежить від кутової швидкості, кутова швидкість змінюється лінійно зі зміною напруги. Для робочих машин з нелінійною механічною характеристикою зміна кутової швидкості електропривода при відхиленні напруги відбувається за складним алгоритмом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Войтюк Д.Г., Лисенко В.П., Мартиненко І.І. [та ін.]. Вплив якості електроенергії на функціонування споживачів у сільському господарстві. *Електрифікація та автоматизація сільського господарства*. 2004. №1(6). С. 3–12.

2. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю. [та ін.]. Основи електропривода. К.: Ліра-К, 2016. 524 с.

УДК 621.313.333:631

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ВІДЦЕНТРОВОГО ТИПУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ У СКЛАДІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Сотнік О. В., к.т.н., доц., e-mail: sotnikolga11@gmail.com
Курдяєв О. І., асп., e-mail: looperook@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасний розвиток аграрного сектору вимагає підвищення енергоефективності технологічних процесів, оскільки електроприводи насосів, вентиляторів і компресорів споживають до 60–70 % загальної електроенергії на підприємствах сільського господарства. У більшості господарств ці приводи працюють у нерегульованому або двопозиційному (увімкнено – вимкнено) режимі, що призводить до надлишкового енергоспоживання, нестабільності мікроклімату в тваринницьких приміщеннях та швидкого зносу обладнання [1]. Перетворювачі частоти (ПЧ) забезпечують можливість плавного регулювання швидкості обертання електродвигуна, що дозволяє зменшити споживану потужність відповідно до кубічного закону ($P \sim n^3$) [1]. За даними досліджень Asea Brown Boveri Ltd та Fraunhofer Institute for Chemical Technology, використання ПЧ у насосних і вентиляторних установках знижує енергоспоживання на 30–50 %, а в системах мікроклімату фермерських приміщень – у середньому на 25–40 % [2]. Використання ПЧ особливо доцільне у технологічних процесах із змінним навантаженням – вентиляції, водопостачанні, опаленні, зрошенні, вакуумних системах доїння, компресорних станціях тощо. Для досягнення максимальної ефективності необхідна автоматизація керування на основі PID- або адаптивних алгоритмів, правильний підбір частотного діапазону, а також узгодження параметрів двигуна та робочої машини з точкою найвищого ККД [1; 2]. В умовах сучасної України, яка переживає енергетичні виклики, пов’язані з пошкодженням енергетичної інфраструктури, підвищенням тарифів на електроенергію та переходом до децентралізованих і відновлюваних джерел енергії, питання енергоефективності стає ключовим фактором стійкості аграрного виробництва. Для більшості сільських регіонів з обмеженим або нестабільним електропостачанням особливо актуальним є використання енергоощадних приводів з ПЧ у поєднанні із сонячними або автономними системами живлення, що дозволяє підтримувати технологічні процеси навіть у періоди дефіциту енергії. Актуальність дослідження зумовлена потребою у комплексній методиці енергоефективного використання ПЧ у складі автоматизованих електроприводів сільськогосподарських машин відцентрового типу, що забезпечить: зменшення енергоспоживання та експлуатаційних витрат; стабільну роботу технологічних систем у нестійких умовах енергопостачання; підвищення енергетичної незалежності агропідприємств; інтеграцію енергоефективних приводів у сучасні системи «розумного фермерства» (Smart Farming) [2]. Розроблення таких рішень є важливим внеском у реалізацію державної політики енергозбереження, сталого розвитку та євроінтеграційних ініціатив України в галузі енергоефективності й відновлюваної енергетики.

Мета дослідження – дослідження шляхів підвищення енергоефективності електроприводів сільськогосподарських машин відцентрового типу шляхом використання ПЧ у складі автоматизованих систем керування, що забезпечують узгодження швидкісних режимів двигуна з фактичним навантаженням і мінімізацію втрат енергії.

Основні матеріали дослідження. 1. Енергетичні втрати в традиційних схемах керування. Дроселювання потоку або часті пуски й зупинки двигуна спричиняють збільшення струмів, нагрівання обмоток і втрати у вигляді тепла. За оцінками досліджень [1; 2], енерговитрати при роботі насосів або вентиляторів у нерегульованому режимі перевищують оптимальні значення на 25–40 %. При цьому реальні процеси у сільському

господарстві (вентиляція, подача води, транспортування повітря або кормів) рідко потребують 100 % потужності двигуна протягом усього циклу. Це створює потенціал для впровадження ПЧ. 2. Використання ПЧ для підвищення ефективності. ПЧ дозволяють змінювати частоту живлення асинхронного двигуна, регулюючи швидкість обертання пропорційно технологічному навантаженню. Відповідно до законів подібності для відцентрових машин ($Q \sim n$, $H \sim n^2$, $P \sim n^3$), навіть незначне зниження швидкості обертання на 10–20 % зменшує споживану потужність майже вдвічі. Результати експериментальних і аналітичних досліджень Fraunhofer Institute for Chemical Technology і Asea Brown Boveri Ltd (ABB) показують, що використання ПЧ у насосних і вентиляторних системах дає змогу знизити енергоспоживання на 30–50 %, забезпечити плавний пуск і гальмування, усунути пікові струми та підвищити надійність двигунів. 3. Автоматизація керування та вибір оптимальних режимів. Для досягнення максимального ефекту необхідна інтеграція ПЧ у систему автоматизованого керування. Використання PID-регуляторів або адаптивних систем керування (AEMS) дозволяє підтримувати стабільні параметри процесу – тиск, температуру, вологість або концентрацію CO_2 у тваринницьких приміщеннях. Оптимізація полягає в тому, щоб робоча точка машини перебувала поблизу – режиму найвищого ККД, при якому зменшуються гідравлічні й механічні втрати. Робота поблизу найвищого ККД знижує вібрації, шум і кавітаційні процеси, що продовжує ресурс обладнання. 4. Технічні умови для ефективного використання ПЧ. Для реалізації енергоефективного електропривода необхідно: використовувати двигуни класу енергоефективності IE3–IE4 відповідно до IEC 60034-30-1; передбачити фільтри вищих гармонік і дроселі для мінімізації впливу ПЧ на мережу; реалізувати зв’язок ПЧ з контролерами PLC або системами SCADA для моніторингу й аналізу енергоспоживання; налаштувати систему діагностики для прогнозування технічного стану двигуна та попередження аварій. 5. Експериментальні та аналітичні дослідження. Для кількісної оцінки ефективності застосування ПЧ доцільно проводити експерименти та моделювання у середовищах MATLAB/Simulink, HOMER, Open DSS. Дослідження повинні охоплювати: зміну споживаної потужності при різних частотах обертання; визначення оптимальної частоти для досягнення найвищого ККД; аналіз впливу ПЧ на гармонічні складові струму та коефіцієнт потужності; порівняння енергоспоживання до й після модернізації системи. 6. Очікувані результати. Очікується, що впровадження автоматизованих електроприводів із ПЧ у технологічних системах сільського господарства забезпечить: зниження витрат електроенергії на 25–45 %; зменшення експлуатаційних навантажень і ремонтних витрат; стабілізацію мікроклімату у тваринницьких приміщеннях; можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії; підвищення енергоефективності та конкурентоспроможності агропідприємств.

Висновок. Застосування ПЧ у системах змінного або навіть постійного навантаження дає відчутний позитивний ефект (у середньому 20–40 %), підвищує надійність електроприводів і зменшує механічний знос обладнання. Для сільськогосподарських об’єктів (вентиляція, водопостачання, мікроклімат) це – найекономічніший шлях підвищення енергоефективності без заміни основного устаткування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Asea Brown Boveri Ltd. How to Make Big Energy Savings with Pumps, Fans and Compressors [Електронний ресурс]. – Zürich: ABB Drives, 2025. – 32 p. URL: https://new.abb.com/drives/energy-efficiency (дата звернення: 20.10.2025).

2. Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT). Energy Efficiency of Variable-Speed Drive Systems in Agriculture [Електронний ресурс]. – Karlsruhe: Fraunhofer ICT, 2024. – 58 p. URL: https://www.ict.fraunhofer.de/en/research (дата звернення: 20.10.2025).

УДК 621.313.3:004.942:378.147

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО СЕРЕДОВИЩА MATLAB/SIMULINK ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ

Сотнік О. В., к.т.н., доц., e-mail: sotnikolga11@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасна підготовка інженера з електричної інженерії вимагає не лише глибоких теоретичних знань, а й сформованих практичних навичок аналізу та керування електротехнічними системами. Традиційно ці компетентності здобувалися під час лабораторних занять з використанням реального обладнання – електродвигунів, трансформаторів, стендів електроприводів тощо. Однак останні роки поставили перед освітньою системою України серйозні виклики: спершу пандемія COVID-19 змусила перейти на дистанційне навчання, що унеможливило проведення повноцінних експериментів у лабораторіях; згодом ситуацію ускладнив воєнний стан, унаслідок якого частина матеріально-технічної бази вищих навчальних закладів була пошкоджена або стала недоступною. Попри ці обставини, навчальний процес має залишатися безперервним, а рівень підготовки – відповідати сучасним вимогам інженерної освіти. Вирішенням цієї проблеми стало використання цифрових засобів моделювання, серед яких провідне місце посідає пакет MATLAB/Simulink, що поєднує аналітичну потужність математичного ядра та зручність візуального середовища Simulink [1]. Це середовище дозволяє реалізувати віртуальні лабораторії, проводити дистанційні експерименти та формувати у студентів практичні компетентності без ризиків і обмежень, характерних для реального обладнання.

Мета дослідження – розгляд особливостей використання MATLAB/Simulink у моделюванні електромеханічних систем як засобу цифрової трансформації навчального процесу.

Основні матеріали досліджень. MATLAB – це універсальне інженерне середовище, яке забезпечує створення математичних моделей систем, розв’язування диференціальних рівнянь, аналіз перехідних процесів, оптимізацію параметрів і візуалізацію результатів. Середовище Simulink надає користувачеві інтуїтивний інтерфейс побудови блок-схем, які відображають структуру реальної системи [1]. Середовище MATLAB/Simulink має потужний набір бібліотек, що охоплюють практично всі аспекти електромеханічних процесів – від побудови електричних схем до моделювання складних систем автоматичного керування, енергетичних установок та приводів. Simulink Library Browser. Це головне вікно, у якому зібрано всі доступні бібліотеки блоків. Користувач може перетягувати блоки на модель, налаштовувати параметри, з’єднувати їх лініями сигналів і виконувати симуляцію. Simulink підтримує як аналітичне моделювання (через рівняння), так і візуальне (через блок-схеми) [1]. Simscape – фізичне моделювання. Пакет Simscape дозволяє створювати моделі на основі реальних фізичних величин (струм, напруга, момент, сила, швидкість) без необхідності вручну формулювати рівняння. Він включає підбібліотеки для різних галузей техніки: Simscape Electrical – електричні та електронні системи; Simscape Driveline – механічні передачі, редуктори, валові з’єднання; Simscape Fluids – гідравлічні та пневматичні системи; Simscape Multibody – механічні системи. Simscape Electrical – це ключова бібліотека для електромеханіки, до складу якої входять: Specialized Power Systems – моделювання електричних машин (асинхронні, синхронні, постійного струму); трансформатори (одно- та трифазні); силова електроніка: тиристори, IGBT, діодні мости, інвертори, перетворювачі частоти; елементи електричних кіл: R, L, C, джерела постійної та змінної напруги, вимірювачі струму та напруги; Powergui – центральний блок аналізу та керування параметрами моделі (тип інтегратора, частота дискретизації, гармонічний аналіз тощо). Electrical Components – резистори, котушки індуктивності, конденсатори, датчики, вимикачі, реле; генератори сигналів (Sine Wave, Step, Pulse Generator); блоки вимірювання потужності,

енергії, напруги, струму; інтерфейси для зв’язку з керуючими сигналами. Simscape Driveline – це бібліотека для моделювання кінематичних і динамічних ланцюгів електромеханічних систем, наприклад: двигун – редуктор – навантаження; обертальні елементи (вальні з’єднання, шестерні, муфти, гальма); можливість поєднання з Simscape Electrical, щоб створювати повноцінні електроприводи. Control System Toolbox – це набір інструментів для аналізу та синтезу систем керування: побудова передавальних функцій, моделей у просторі станів; розрахунок стійкості, перехідних процесів; частотних характеристик; проектування ПІД-регуляторів та оптимальних систем. Ця бібліотека особливо важлива при створенні замкнених систем автоматичного регулювання електроприводів. Signal Processing Toolbox – використовується для: фільтрації сигналів, аналізу гармонічного складу, обробки осцилограм, спектрального аналізу напруги, струму, момент, побудови частотних характеристик та спектрів ряду Фур’є. MATLAB Function Blocks. Дозволяють користувачеві вставляти у модель власні програмні алгоритми (у вигляді коду MATLAB). Це дає змогу реалізувати: інтелектуальні регулятори; логіку керування пусками двигунів; спеціальні математичні перетворення. Additional Libraries: Stateflow – моделювання дискретних станів і логіки переходів між ними (наприклад, режими роботи привода); Optimization Toolbox – оптимізація параметрів регулювання, мінімізація втрат; Simulink Real-Time - для підключення моделі до реального обладнання (Hardware-in-the-Loop, HIL). Візуалізація результатів. Scope, XY Graph, Display – для спостереження за часовими залежностями напруги, струму, швидкості, моменту; To Workspace - для передачі результатів у MATLAB для подальшої обробки; Dashboard Blocks – для створення віртуальних панелей керування (стрілкові індикатори, вимірювачі тощо).

Таким чином, у MATLAB/Simulink [1]: модель створюється як єдина інтегрована система, де поєднуються електричні, механічні та керувальні підсистеми, що дозволяє аналізувати енергетичні процеси в комплексі; реалізується фізична взаємодія між електричною та механічною частинами, тобто враховується реальний зв’язок між струмом, моментом і швидкістю обертання; використовується не лише для побудови схем, а й як інструмент експериментального дослідження – з можливістю змінювати параметри в реальному часі, будувати осцилограми, порівнювати режими (пуск, усталений стан, коротке замикання, гальмування тощо); для підвищення наочності розроблені візуальні моделі з елементами цифрової лабораторії, які можуть бути використані студентами у дистанційному форматі без доступу до фізичного стенду.

Висновок. У роботі MATLAB виступає не лише як інструмент чисельного аналізу, а як платформа інтеграції теоретичного, практичного та дослідницького компонентів навчання. На відміну від класичних підходів, де результати подаються у вигляді формул, таблиць або графіків, моделювання в MATLAB/Simulink дозволяє спостерігати перехідні процеси в часовій області, оцінювати динаміку електромеханічних систем у візуальній формі та здійснювати швидку оптимізацію параметрів. Такий підхід розширює межі традиційної інженерної освіти, формує у студентів цифрове мислення й уміння працювати з сучасними інструментами інженерного аналізу, що є особливо важливим у сучасних умовах дистанційного навчання та цифрової трансформації технічних дисциплін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. MathWorks Inc. MATLAB and Simulink Documentation. Natick, MA: The MathWorks, 2025. URL: https://www.mathworks.com/ (дата звернення: 20.10.2025).

УДК 615.831.47.125

ТЕРМОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ КОРЕНЕВОЇ СИСТЕМИ В УСТАНОВКАХ ГІДРОПОНІКИ

Сухін В. В., ст. викл., e-mail: vv.suchin.tkt@btu.kharkiv.ua
Лисиченко М. Л., д.т.н., проф., 1prlysychenko@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Аналіз офіційних статистичних даних, які характеризують галузь овочівництво доводять, що вона є бюджетоформуюча аграрного сектора, тобто у структурі валової продукції рослинництва становить майже 20 %. Однак, перехід в останні роки до вирощування овочевих культур у господарствах населення та дрібних фермерських господарствах посилюється відрив реального виробництва від наукових надбань, новітніх технологій, якісного насіння та суттєво обмежує можливості інвестиційно-інноваційного розвитку. Внаслідок руйнації великотоварного виробництва почастішали і стали більш відчутними коливання на ринку ціни на деякі види овочевих культур [1]. Одним із шляхів розв'язання проблеми є розробка перспективних енергоефективних нових технологій під окремі овочеві культури з використанням прогресивних заходів їх вирощування з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов.

Відомо, що інноваційно-інвестиційна привабливість галузі у забезпеченні рентабельності була на рівні 30 % у 2020 р., а далі очікується що буде зростатиме з 2025 р. до 50 %, при вкладенні інвестиційних коштів у межах 50–80 тис. грн/га за умови дотримання технологій вирощування овочів гарантовано можна отримати чистий прибуток за виробничий цикл у розмірі 15–40 тис. грн/га, а щорічний очікуваний прибуток галузі по оцінкам експертів може досягати близько 25 млрд грн.

Тому, перспективним напрямком є розробка лазерних технологій для активізації споживання біохімічних речовин із живильного розчину при вирощуванні овочів в спорудах захищеного ґрунту [2].

Мета дослідження – оцінити дію оптичного випромінювання на рослину при вирощуванні їх в закритих спорудах захищеного ґрунту.

Основні матеріали досліджень. Відповідно основних положень квантової теорії дія оптичного випромінювання на рослину і виконання в них певної роботи часто має квантову (фотонну) природу. Поряд із такими параметрами, як спектр та енергія оптичного випромінювання, характеризується також і ентропія, величина якої залежить від такої характеристики як яскравість та довжина хвилі випромінювання. Особливо це є важливим коли мова йде про лазерне випромінювання видимого діапазону оптичного спектру випромінювання [3].

Відносна величина потоку ентропії в потоці енергії випромінювання визначає роботоздатність променевої енергії. Так у первинних фотофізичних процесах поглинання та розсіювання роботоздатність знижується і для кількісної оцінки енергетичного виходу фотофізичних та фотохімічних реакцій розглянемо наступні моделі впливу роботоздатності випромінювання на загальну ефективність фотонних процесів: зменшення роботоздатності кожного фотона (наявність ентропії фотона); зменшення кількості фотонів у загальному потоці випромінювання.

Теоретичні дослідження проводили на прикладі лазерної обробки кореневої системи в установках гідропоніки (рис.1). Так, теоретичні дослідження першої моделі, показують, що для заданого діапазону спектру дії фотореакції її первинна ефективність пропорціональна квадрату роботоздатності випромінювання. Тобто, при заданій роботоздатності випромінювання η_{ov} для кожного значення червоної межі фотореакції λ_r можливо рекомендувати оптимальне значення короткохвильової межі спектру дії:

$$\lambda_{r\,opt} = \lambda_r \,(1 - \sqrt{1 - \eta_{ov}}) \,. \qquad (1)$$

При якому первинна ефективність фото реакції має значення:

$$\lambda_{r\ opt\ max} = \lambda_r\ (1 - \sqrt{1 - \eta_{ov}}) = \lambda_{r\ opt} / \lambda_r\ . \qquad (2)$$

Для прикладу, коли λ_r = 680 *нм*, що відповідає червоній межі спектру дії фотосинтезу рослин, зумовлений збудженням хлорофілу, а за реальних значень роботоздатності випромінювання η_{ov} = 0,85-0,93 для λ_r = 380 *нм*, що відповідає нижній границі спектру фотосинтезу. За умови вірності прийнятої гіпотези, отриманий результат підтверджує енергетичну ефективність фотосинтезу з термодинамічної точки зору.

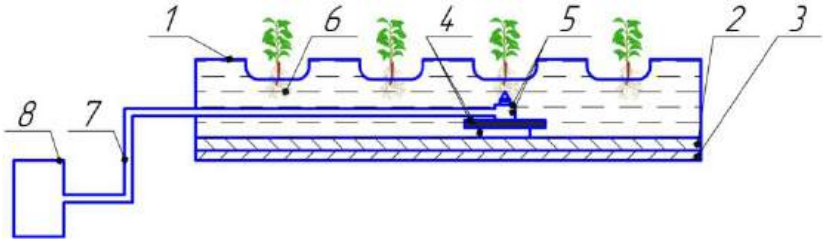


Рисунок 1 – Умови опромінення напівпровідником лазером кореневої системи рослин: 1 – ємність із розчином субстрату для утримання рослин; 2 – направляюча для пересування платформи з аератором і лазером; 3 – підігрів ємності з розчином; 4 – пересувна платформа; 5 – аератор і лазер; 6 – розчин живильного субстрату; 7 – повітрянопровід; 8 – насос для подачі повітря

Відповідно другої моделі, роботоздатність фотонів не залежить від термодинамічних параметрів випромінювання, тоді спектр дії фотореакції залишається незмінним, а зменшення кількості фотонів враховується, як зменшення спектральної густини падаючого потоку випромінювання. Тобто, враховуючи незначну залежність η_{ov} від довжини хвилі у вузьких спектральних діапазонах, у цьому випадку ми отримуємо:

$$\eta_{ef} = 0{,}5\ (1 + \lambda_1/\lambda_r)\ \eta_{ov}. \qquad (3)$$

Результат розрахунків показує, що у цьому варіанті ефективність потоку випромінювання у первинній фотореакції прямопропорційна первинній роботоздатності випромінювання і лінійно зменшується зі збільшенням діапазону спектру дії $\lambda_1 \ldots \lambda_r$.

Висновок. Отже, проведений теоретичний аналіз двох варіантів моделей впливу термодинамічних параметрів оптичного випромінювання на первинну ефективність фотореакцій приводить до принципово різних результатів, причому ефективність у другому варіанті суттєво вища, ніж у першому варіанті. Віддати перевагу будь якій моделі можна буде лише після подальших фізичних експериментів, а отримані результати, не дивлячись на ряд прийнятих припущень, все ж можуть бути використані в подальшому при попередній оцінці впливу оптичного випромінювання на біологічні об’єкти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стратегія розвитку сільськогосподарського виробництва в Україні на період до 2025 року / За ред. НААН України Я. М. Гадзала, М. І. Бащенка, В. М. Жука, Ю. О. Лупенка. – Київ: Аграр. Наука, 2016. 216 с.

2. Кіпенський А. В. ін. Лазер і здоров’я. / А. В. Кіпенський, Л. Я. Васильева-Лінецька Л.Я, Вуйцік Вайльдемар, Н. І Заболотна, Н. М. Качалова, Л. Г. Коваль, П. Ф. Колісник, О. С Комарова, В. В. Куліченко, М. Л. Лисиченко, З. М. Микитюк, В. С. Павлов, С. В. Павлов, Є. Г. Русанова, Й. Р. Салдан, О. Є Сушинський, С. В. Тимчик, С. Є. Тужанський, В. В. Холін, Д. Х. Штофель // Под ред. А. В. Кіпенського. – Харків: Кумунальне підприємство «Міська друкарня», 2024. 387 с.

УДК 621.316.2

РОЗРОБКА МУЛЬТИМОДАЛЬНОЇ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК НА БАЗІ МОДУЛЬНОЇ АРХІТЕКТУРИ

Товт Ф. Ф., асп., e-mail: ftovt307@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності та прогнозної здатності систем технічного моніторингу електроустановок в умовах промислової експлуатації. Вперше було здійснено формалізацію та модульну симуляцію десяти діагностичних методів у єдиній модельній рамці, що дозволило провести об'єктивне порівняння фізичних процесів і відмовних механізмів. Систематичний аналіз підходів підтвердив, що мультимодальна діагностика (MCSA + FFT, PD + AE) є ключовим чинником для підвищення чутливості та точності виявлення дефектів. Крім того, інтеграція адаптивних алгоритмів, таких як Kalman-фільтр, Digital Twin та нейронно-нечіткі системи, виявилася вирішальною для зростання стійкості і прогнозної здатності системи. Обраний модульний підхід з використанням загальної шини даних та уніфікованою інтеграцією сенсорів гарантує швидке розгортання нових алгоритмів, забезпечуючи оптимальний баланс між точністю, швидкістю реагування та ресурсною ефективністю. Отримані результати підкреслюють необхідність створення уніфікованої платформи для комплексної діагностики, відкриваючи перспективу розробки самонавчальної гібридної системи з мінімальною участю оператора, широкомасштабним застосуванням хмарних технологій і розподіленого навчання.

Інтеграція адаптивних та прогнозних алгоритмів виявилася ключовим чинником, що забезпечує значне зростання стійкості діагностичної системи та її прогнозної здатності щодо розвитку дефектів електроустановок. Для збільшення стійкості, тобто мінімізації впливу шуму і похибок, використовується Kalman-фільтр – рекурсивний алгоритм, який адаптивно оцінює справжній стан обладнання, дозволяючи отримувати більш точні та стабільні тренди вимірювань, критично важливі для ідентифікації прихованих пошкоджень. Паралельно для реалізації прогнозної функції застосовується технологія Digital Twin (Цифровий Двійник), яка є віртуальною копією фізичного обладнання. Цей двійник інтегрує всі дані моніторингу, дозволяючи симулювати сценарії відмов та прогнозувати залишковий термін служби (RUL) обладнання. Крім того, для забезпечення комплексного інтелектуального аналізу та прийняття рішень інтегровано нейронно-нечіткі системи. Вони поєднують здатність нейронних мереж до навчання та розпізнавання складних залежностей з прозорістю нечіткої логіки, що дозволяє автоматично класифікувати типи дефектів і приймати рішення про критичність стану навіть за неповних даних. Таким чином, ця інтеграція перетворює діагностичну систему з пасивного реєстратора на активний, самонавчальний та прогностичний інструмент управління технічним станом.

Висновок. Проведене дослідження підтвердило, що мультимодальна діагностика та формалізація методів у єдиній модульній рамці необхідні для підвищення чутливості виявлення дефектів електрообладнання. Обрана модульна архітектура забезпечує швидке розгортання нових алгоритмів та оптимальний баланс між точністю і ресурсною ефективністю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Товт Ф. Ф. Аналіз можливостей машинного навчання для аналізу технічної діагностики електрообладнання [Текст] / Ф. Ф. Товт, М. С. Сорокін // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., ДБТУ, 9 листоп. 2023 р. - Харків, 2023. - С. 137-138.

УДК 621.314.112

РОЗРОБКА Й ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРИФУГИ НА ЦУКРОВОМУ ЗАВОДІ

Толканець А. А., магістр, e-mail: tolkanetc_89aa@gmail.com
Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Основним механізмом який виконує кристалізацію утфеля на цукровому заводі є центрифуга. У зв'язку з постійним зростанням вимог до якості та безпеки виготовлення цукру, а також збільшенням обсягів виробництва, технологічний процес потребує постійної модернізації та автоматизації [1].

Автоматизовані системи керування при виготовленні цукру дозволяють підвищувати продуктивність зі зниженням енерговитрат в електроприводах та оптимізувати технологічні процеси.

Мета дослідження – розробка заходів по зниженню енерговитрат в електроприводах центрифуги при виготовленні цукру.

Основні матеріали досліджень. Дослідження показує, що практично на всіх підприємствах по виготовленню цукру, важливе місце займає електропривод, і він є основним керованим джерелом механічної енергії.

Технологічний процес виготовлення цукру на підприємствах включає етапи: екстракція, очищення, випарювання, кристалізація.

Одним з найбільш поширених промислових методів розділення різнорідних рідких систем є центрифугування, яке реалізується в спеціальних машинах – центрифугах. Як показують довготривалі дослідження, з кожним роком, саме до центрифуг висувають значні вимоги.

На підприємствах по переробці цукрових буряків поява нових технологій та все більша різноманітність механізмів, машин та агрегатів висувають перед системою автоматичного керування електроприводами нові та складні завдання. Якщо для окремих механізмів потрібно лише забезпечення плавного пуску електродвигуна, то для інших встановлених механізмів на одній технологічній лінії (для підвищення продуктивності) виникає необхідність плавного і синхронно змінювати робочу частоту обертання всіх двигунів [2]. У цих випадках вимоги точності стабілізації частоти обертання кожного двигуна визначається лише необхідністю підтримання заданої продуктивності [3, 4].

Під час дослідження були сформовані основні вимоги до електроприводу таких центрифуг: забезпечити оптимальні динамічні режими при постійному прискоренні і уповільненні центрифуги і стабілізація її частоти обертання при завантаженні, вивантаженні і фугуванні [5].

Для остаточного прийняття рішення щодо вибору системи електричного приводу здійснили порівняння існуючих систем з позиції технічної ефективності.

Використання двигунів постійного струму і системи побудовані на їх основі є недоцільним оскільки вони мають значні масо-габаритні показники порівняно з двигуна змінного струму і потребують значно більших витрат на обслуговування та ремонт.

Якщо врахувати великі моменти інерції центрифуг, то питання застосування економічного електроприводу, що забезпечує рекуперацію енергії в мережу при гальмуванні, тут займає важливе місце. В роботі розглядали асинхронні двигуни з контактними кільцями і з фазним ротором в порівнянні з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.

Висновок. В науковій роботі була розроблена схема керування електропривода фільтруючої підвісної центрифуги. Для ротора центрифуги була розрахована потужність приводного двигуна, проведений вибір двигуна, силового устаткування. Побудовані механічні характеристики в режимах пуску і гальмування електроприводу. Отриманий математичний опис силової частини електроприводу як об'єкту управління.

Розглянуто класифікацію та зовнішній вигляд центрифуги. А також основні режими його роботи. Здійснено розрахунок статичного моменту на валу двигуна, час роботи та побудовано тахограми механізму. Здійснено техніко-економічне обґрунтування вибору системи керування на користь системи: перетворювач частоти – асинхронний двигун. Вибрано двигун для центрифуги.

У науковій роботі здійснена перевірка правильності вибору електричного двигуна методом еквівалентного моменту. Розраховано силові елементи, такі як автоматичний вимикач та запобіжник для захисту двигуна від перевантажень та струму короткого замикання. Вибрано типи та габарити цих елементів для обраного двигуна. Розроблено структурну схему електропривода, на основі якої накреслена електрична принципова.

Розробили схему з'єднання для схеми керування електродвигуном з двох місць, що дозволяє включати його будь-який з двох кнопок «Пуск», і зупинити будь-якою кнопкою «Стоп».

Проведений розрахунок та настройка регуляторів струму і швидкості як ПІ так іП-регулятори.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Корчемний М. О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. О. Корчемний, В. С. Федорейко, В. П. Щербань – Тернопіль.: Підручники і посібники, 2001. – 84-90с.
2. Червінський Л.С. Моделювання регульованого електропривода, апаратів та потокових ліній / Л. С. Червінський, І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко [та ін.]. – К.: Агроосвіта. 2013. – 240с.
3. Регульований електропривод: Підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко; За ред. І. М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.
4. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. для студентів вищ.навч.закл. / М. Л. Лисиченко, П. І. Савченко, О. К. Тищенко, В. В. Гузенко. — Х: ХНТУСГ; Факт, 2012. – 500 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. 984 с.

УДК 681.51

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОБОТИ ТВЕРДОПАЛИВНОГО КОТЛА ДЛЯ ПЕКАРСЬКОЇ ШАФИ

Хандола Ю. М., к.т.н., доц., e-mail: xandola@ukr.net
Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@btu.kharkov.ua
Рогоза А. О., магістр, e-mail: ark2rianec@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день велика увага приділяється проблемі раціонального харчування та виробництва продуктів високої харчової цінності. Так, більшість видів хліба та борошняних виробів, зокрема кондитерських виробів випікають традиційно в електричних радіаційно-конвективних печах. Аналіз літературних джерел показав, що температурні та паровологісні режими випікання бісквітних напівфабрикатів у різних печах різні. Створити оптимальний режим, що забезпечує вироблення виробів гарної якості, при високих техніко-економічних показниках, вкрай складно, так як важко регулювати тепловий режим. Температура верхньої поверхні виробів до завершення випічки повинна становити 145–150 °С, щоб вийшло золотисте забарвлення, а вища температура викликає потемніння та ущільнення поверхневого шару. Критерієм для визначення готовності виробів, може бути температура центрального шару бісквітного напівфабрикату наприкінці випікання 95–98 °С [1].

Професійні пекарські шафи є незамінним елементом для будь-якої їдальні чи ресторану, вони встановлюються на виробництвах у кондитерських цехах, невеликих пекарнях, булочних, закладах громадського харчування, де важливо швидко забезпечити високу якість випічки. Пекарські шафи забезпечують рівномірний розподіл тепла по всьому внутрішньому об'єму, що дозволяє досягати ідеальних результатів у випічці [1].

Через підвищення цін на електроенергію та аварійні відключення на невизначений час, а також для незалежної та стабільної роботи, приватні пекарні переходять на альтернативні джерела енергії. Один з перспективних напрямків, це застосування твердопаливних котлів невеликої продуктивності для нагрівання повітря в пекарських шафах.

Управління режимами роботи таких котлів не оптимізовано, що знижує ефективність їх роботи. Крім того, відсутня методика вибору таких котлів для роботи з пекарськими шафами. Особливістю роботи малих твердопаливних котлів є періодичне подавання твердого палива і відповідно нерівномірність процесу горіння.

Мета дослідження – підвищення енергоефективності процесу вироблення тепла, шляхом автоматизації режимів роботи твердопаливного котла невеликої продуктивності, з періодичним завантаженням твердого палива, для пекарської шафи.

Основні матеріали досліджень. Система автоматичного регулювання режимів роботи твердопаливного котла, невеликої продуктивності, має бути досить простою та недорогою, та нескладною в обслуговуванні та налаштуванні з метою легкості обслуговування та використання малокваліфікованим персоналом. Вона повинна враховувати періодичність завантаження палива і нерівномірність процесу горіння, що виникає внаслідок цього. Система повинна включати можливість регулювання подачі повітря відповідно до процесу горіння, а також повинна бути передбачена можливість регулювання маси палива, що завантажується, або періоду завантаження для підтримання необхідної температури повітря яка подається в камеру для випікання [2].

Для виконання зазначених вимог система автоматики повинна включати такі елементи.

1. Контролер для загального керування роботою котла. Для контролювання температури, швидкості руху повітря, завантаження палива, вимірювання вмісту чадних газів, доцільно застосувати контролер *Simens LOGO*. Ці програмовані логічні контролери призначені для автоматизації виробничих процесів в промисловості та побуті.

2. Датчик температури в середині пекарської шафи для визначення необхідної кількості вироблення тепла, необхідно використовувати датчик температури із перетворювачем сигналу *MBT 3560 0001-0050-10-120*.

3. Датчик температури у камері згоряння твердого палива. Для цього використати термопари типу *TP-16/1000*, з діапазоном температури вимірювання від 100°С до +1000°С, вони сумісні з терморегуляторами та пристроями обробки сигналів.

4. Датчик контролю повітряного потоку. Електронне реле контролю повітряного потоку *RHEASGARD KLGF* вимірює швидкість потоку, перетворюючи сигнал вимірювання в нормований сигнал 0-10 В. Використовується для контролю та управління повітряними потоками в повітропроводах.

5. Датчик рівня *DLS-27N-20* сигналізує про рівень твердого палива в ємності. Паливо засипається в ємність, яка знаходиться над котлом, і подається автоматично до камери згоряння шнековим транспортером.

Контроль за тепловим режимом в пекарській камері здійснюється датчиком температури. Розбаланс у вигляді різниці уставки та виміряного значення подається на контролер, де перетворюється в цифровий сигнал, розраховується і перетворюється в аналоговий та передається на перетворювач частоти. Перетворювач змінює частоту струму, яка подається на електродвигун, чим змінює швидкість обертання електроприводу шнекового транспортера, який пересуває паливо в камеру згорання. Якщо температура повітря перевищує норму, то електродвигун сповільнює свої оберти. Якщо температура нижча за задану, то пришвидшує обертання, чим збільшує подачу палива [3].

Подача повітря в камеру згоряння відбувається за допомогою припливного вентилятора. Принцип регулювання швидкості повітряного потоку заснований на мінімізації сумарних втрат тепла з газами від хімічної неповноти згоряння палива. Температура газів не повинна опускатися нижче 120 °С, щоб уникнути випадання конденсату, в якому, в тому числі може бути сірчана кислота [2].

Принцип роботи системи вентиляції полягає в тому, що датчик контролю повітряного потоку зчитує поточне значення тиску в повітропроводі та передає його на контролер. Отриманий сигнал перетворюється в цифровий, порівнюється зі встановленим значенням уставки та передається на перетворювач частоти. Регулювання подачі повітря здійснюється за рахунок зміни швидкості обертання електропривода вентилятора перетворювачем частоти. Значенням уставки буде значення потрібного тиску, яке обчислюється у відповідності до кількості завантаженого палива у камеру згорання [3].

Робота котла починається з автоматичної подачі палива шнековим транспортером в камеру згоряння та його розпалювання. Стабільне горіння в камері підтримується припливним вентилятором, він автоматично створює заданий потік повітря яке проходить через спірально розташовані труби та нагріває їх. Другий потік повітря, який циркулює між гарячими трубами та пекарською шафою, нагрівається до температури, достатньої для випічки і попадає в камеру для випікання хлібобулочних виробів.

Висновок. Автоматизації роботи твердопаливного котла дозволила підвищити енергоефективність та екологічні характеристики процесу вироблення тепла. Запропонована система автоматичного регулювання враховує нерівномірність процесу горіння і за допомогою датчиків регулює подачу палива та повітря в камеру згоряння, для підтримання необхідної температуру повітря в камері для випікання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Автоматизація виробничих процесів: підручник / О. І. Черевко, Л. В. Кіптела, В. М. Михайлов, О. Є. Загорулько. Харків: ХДУХТ, 2014. 186 с.

2. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності: монографія / Д. В. Степанов, Л.А. Боднар. Вінниця: ВНТУ, 2011. 148 с.

3. Електропривод і автоматизація: навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, І. П. Ільїчов, Ю. М. Хандола. Київ: Аграр Медіа Груп, 2013. 586 с.

УДК 621.3.067: 631.371.07

РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ ВОДИ В БАГАТОПОВЕРХОВОМУ БУДИНКУ

Хандола Ю. М., к.т.н., доц., e-mail: xandola@ukr.net
Корольов А. О., асп., e-mail: andrey.korolew.3497@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. На сьогоднішній час велика увага приділяється виробництву і практичному застосуванню регульованого електроприводу змінного струму, однак, відповідно статичних даних з різних інформаційних джерел у промислово розвинутих країнах 30-40 % усіх електроприводів є регульованими, а в Україні не перевищує 5 % [1].

Аналіз науко-технічної літератури показує, що найбільш перспективними об’єктами застосування регульованих електроприводів є вентиляційні установки, установки водопостачання [2].

Проблема неправильного тиску у водопроводі стає все більш актуальною, особливо у сучасних багатоповерхових будинках. Жителі перших поверхів часто стикаються з надлишковим тиском, що досягає 7-8 бар, тоді як верхні поверхи можуть відчувати його гостру нестачу. При цьому наслідки неконтрольованого тиску можуть бути вкрай серйозними – від кранів, що постійно капають, до розриву труб і виходу з ладу дорогої побутової техніки. Стандартні показники тиску води у водопроводі регламентуються будівельними нормами. Для комфортного використання води з побутовою метою (прийняття душу, миття посуду, прання) оптимальним вважається тиск 2-3 бари. За таких показників забезпечується нормальна робота більшості побутових приладів без ризику їх ушкодження.

Мета дослідження – розробка енергоефективної системи керування електроприводом насосної станції багатоповерхового будинку на основі використання перетворювача частоти струму.

Основні матеріали досліджень. Робота виконувалась на замовлення ТОВ «МОБІЛЬКОМУНСЕРВІС» смт Пісочин Харківського району, Харківської області.

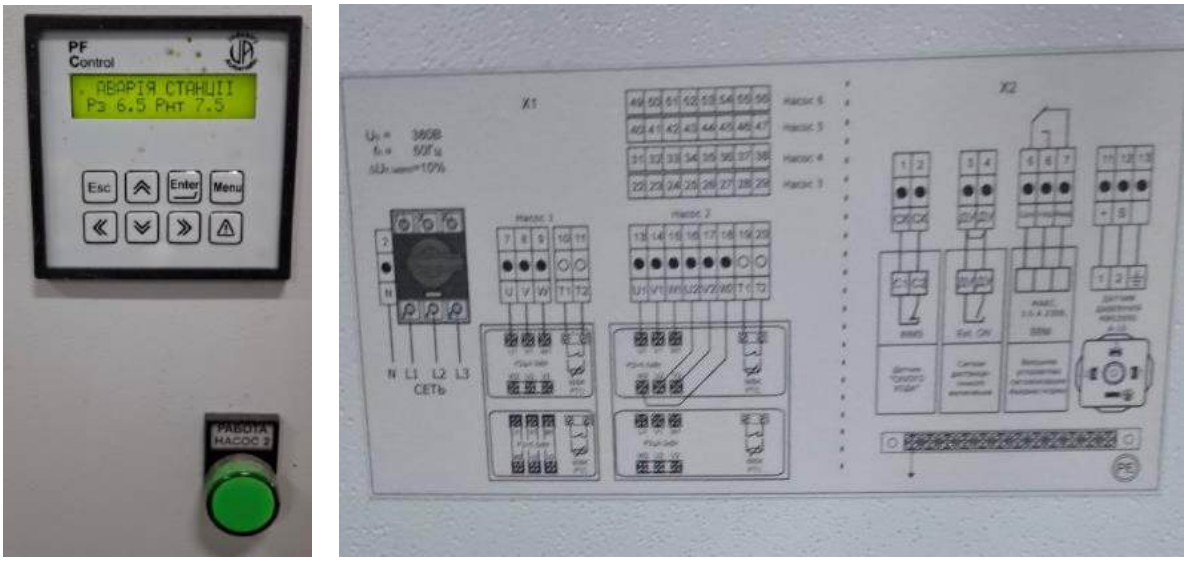


Рисунок 1 – Пульт керування і мнемосхема резервної насосної установки

Автоматизація насосної станції системи водопостачання – це рішення, яке забезпечує безперебійну подачу води, стабільний тиск і зручність у користуванні. Системи автоматизації мінімізують втручання людини, економлять енергію та продовжують термін служби обладнання. Електронне реле тиску через контролер не тільки керує насосом або насосною групою, але й забезпечує низку захисту для обладнання, трубопроводу та арматури. Це захист від сухого ходу, захист від перевантажень, система антиблокування насоса, система автоматичного перезапуску насоса – все залежить від набору функцій кожного конкретного електронного контролера. Найбільш ефективним варіантом вважається автоматика з частотним перетворювачем. Таке управління насосної станції значно підвищує її енергетичну ефективність, тобто знижує витрати на електроенергію.

Показник економії доходить до 70%, якщо порівнювати із звичайною релейною автоматикою. Частотний перетворювач змінює оберти двигуна, його потужність і, відповідно, споживання залежно від витрати води. Якщо води витрачається у меншій кількості, насос працює на менших обертах, в економному режимі. Як тільки споживання води зростає, контролер дає команду двигуну працювати швидше, а у разі двоагрегатної станції підключить до роботи другий насос [3].

Таким чином, автоматизована система керування двонасосною станцією, дозволяє підтримувати заданий тиск у системі водопостачання шляхом регулювання частоти обертання насосів та різних варіантах перемикання насосів.

При цьому схема підтримує тиск в системі водопостачання завдяки перемиканню насосів на резервне підключення при відмові основного насосу, місцеве та дистанційне управління при живленні як від перетворювача, так і без нього, плавний пуск,автоматичний режим роботи.

Шафа керування (рис. 1) вміщує силову комутаційну апаратуру, апарати захисту, блок управління, перетворювач частоти, блок автоматичного включення резерву. Також до шафи підключається контролер, датчик тиску, пульт дистанційного керування.

Висновок. Таким чином, запропонована електрична схема керування електроприводом насоса з використанням перетворювача частоти типу EI-8001 і диференціального реле DS 650, яка при модернізації існуючих приводів не вимагає особливих вкладень та дозволяє не тільки регулювати частоту обертання двигуна, але і захищати людей від можливих витоків струму. Крім того, розроблена схема керування системи ПЧ-АД дозволить знизити кількість підключень та відключень насосних агрегатів, знизити знос трубопровідної арматури за рахунок зменшення гідравлічних ударів, зменшить непотрібний високий тиск у водопровідній мережі за рахунок його стабілізації, і як результат будуть знижені не тільки перевитрати води, а і зменшені витрати електроенергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електропривод і автоматизація: навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Ю. М. Хандола, І. П. Ільїчов; за ред. О. Ю. Синявського. Київ: Аграр Медіа Груп, 2013. 586 с.

2. Регульований електропривод: підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торапов, О. В. Санченко; за ред. І. М. Голодного. Київ: ТОВ «ЦП «Компринт», 2015. 509 с.

3. Курс лекцій з електроприводу сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: підручник / І. А. Гаврилюк, Ю. М. Хандола. Харків: Факт, 2008. 578 с.

УДК 641.528.54

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСІВ ДЛЯ ПЕРЕКАЧУВАННЯ МОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Хандола Ю. М., к.т.н., доц., e-mail: xandola@ukr.net
Корольов А. О., асп., e-mail: andrey.korolew.3497@gmail.com
Пащенко О. М., студент магістратури, olegkharkov2017@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У процесі перекачування і переробки молока та молочних продуктів дуже важливо забезпечити максимальне збереження біохімічних характеристик, тому, вимоги до технологічних установок у молочній індустрії постійно удосконалюються одночасно з підвищенням якості продукції і рентабельності виробництва [1].

При переробці молока необхідний рівномірний та постійний потік, який досягається далеко не кожним типом насоса. Необхідно враховувати властивості та якості продукту, такі як в'язкість, стійкість до зміни температури, біохімічна активність конструктивних матеріалів та ін. [2, 3].

Мета дослідження – провести аналіз конструктивних і технологічних особливостей молочних насосів, їх функціонування та вплив на молочну продукцію.

Основні матеріали досліджень. Відомо, що насоси можна розділити на відцентрові та об'ємні: відцентрові насоси – це насоси, що мають вбудоване робоче колесо з лопатями, яке, обертаючись із досить високою постійною швидкістю, надає руху рідини, результатом є прискорений рух частинок рідини, що створює падіння тиску на вході і як наслідок, відбувається процес всмоктування рідини у насос. Кінетична енергія рідини збільшується, рідина перекачується зсередини насосного пристрою в напірний трубопровід [4].

Для швидкого і якісного перекачування молока доцільно використовувати молочні насоси фірми *SPOMASZ ZAMOŚĆ S.A.,* вони відповідають усім вимогам до обладнання, яке використовується при виготовленні харчових продуктів. Причому вони мають міцну конструкцію із високоякісних матеріалів, безпечні, довговічні, економічні та надійні в експлуатації. Конструкція насосів виконана без мертвих зон – закутків та щілин, куди утруднений доступ миючих та дезінфікуючих засобів. Робочі колеса насосів відлиті з хромонікелевої литої сталі методом, що дозволяє проводити їхню обробку з шорсткістю поверхні <0,8 *мкм*, а усі робочі колеса статично відбалансовані, що підвищує строк служби насоса. Кулачкові насоси використовуються для перекачування молочних продуктів підвищеної в'язкості. Принцип роботи кулачкових насосів наступний: рідина надходить у камеру, накопичується та виштовхується завдяки двом роторам, що синхронно обертаються, але не стикаються один з одним, а відстані між ними достатньо, щоб пропускати шматочки.

Застосування кулачкових насосів *JEC PUMPS ZL450*, це оптимальне рішення у молочному виробництві для перекачування в'язких середовищ та суспензій завдяки високій якості полірування внутрішніх частин та гігієнічності, у поєднанні з відмінними технічними показниками.

Імпелерні насоси – специфічний вид насосного обладнання, що поєднує в собі переваги насосів динамічної дії і об'ємних насосів. Робочий орган імпелерного насоса – гнучка крильчатка (імпелер), яка розміщена в корпусі з певним зміщенням. За рахунок зміщення робочого колеса щодо корпусу і гнучкості пелюсток, при його обертанні, з одного боку отримуємо зону з низьким тиском, з протилежного – зону високого тиску. Продукт потрапляючи в зону низького тиску, затягується у всмоктувальний тракт, і переміщаючись між пелюстками, виштовхується в напірний патрубок. Такий принцип роботи насоса дає наступні переваги: плавність роботи; можливість перекачувати в'язкі рідини; можливість «сухого всмоктування»; дбайливе, неруйнівне перекачування структурних продуктів.

Імпелерні насоси, компанії *ZAMBELLI* (Італія), ефективно зарекомендували себе при виробництві згущеного молока, йогурту, кисломолочних продуктів. Навпаки, гвинтові (або

шнекові) насоси складаються з одного або декількох гвинтів, які щільно розташовані в корпусі, з торцевих сторін розташовані усмоктувальний та нагнітальний патрубки. Обертаючись, гвинт змінює об'єм порожнин і змушує продукт просуватися по спіралі від всмоктувального патрубка до нагнітального. Завдяки цьому, подача речовин відбувається регулярно, гладко і без різких коливань.

Найбільш популярними продуктами, які можна транспортувати гвинтовим насосом, є йогурт, сметана, вершки, плавлений сир, згущене молоко тощо. Частинки, що входять до складу продукту, не руйнуються, не дробляться і не змішуються з базовою рідиною.

Гвинтові насоси *SYDEX* адаптовані під потреби харчової промисловості, де важливі гігієна та санітарне виконання, працюють в діапазоні швидкостей від 0 до 1000 *об/хв*, для точного дозування та пропорційної подачі продукту.

Харчові поршневі (плунжерні) насоси у більшості випадків застосовують для перекачування густих мас та рідин або ж продуктів з підвищеною густиною і в'язкістю, які можуть включати також тверді частинки і згустки. У якості робочого органу в ньому використовується поршень, який переміщується у циліндрі. При переміщенні поршня у циліндрі в одну сторону створюється розрідження за його поперечною площиною поршня з одного боку, а також надлишковий тиск з іншого. Таким чином, відбувається переміщення продукту з ємності під дією сили атмосферного тиску в зону створення розрідження і виштовхування продукту надлишковим тиском в іншу ємність або напірний трубопровід.

Найкраще у виробництві молочної продукції зарекомендували себе насоси від провідної компанії *Candigra* (Іспанія), переважно вони використовуються як вимірювальні насоси або в якості дозаторів.

Пневматичні мембранні насоси перекачують молочні маси із високою в'язкістю. Робота пневматичного насоса заснована на проштовхуванні рідини через камери завдяки роботі мембран, які прикріплені до протилежних кінців валу, розташованого в центрі корпусу. Повітря під високим тиском подається через клапан до поршня, який по черзі відштовхує в бік то одну, то іншу мембрану. Завдяки цьому одна з мембран виштовхує рідину, а інша одночасно всмоктує нову рідину. Цей процес відбувається завдяки частковому вакууму, який створюється, коли повітря за мембраною виштовхується в атмосферу. Під час виробництва сиру необхідно використовувати мембранний насос *DEPA DL50* який з мінімальними пошкодженнями перекачує сирне зерно та значно покращує його якість.

Висновок. Для енергоефективного перекачування молока та рідкої молочної продукції необхідно використовувати відцентрові насоси; для перекачування таких продуктів як сметана, йогурт, вершки йогурту, кисломолочні продукти необхідно використовувати імпелерні насоси; для перекачування плавленого сиру, кремів, вершкового масла необхідно використовувати кулачкові насоси; для перекачування густих мас таких як згущене молоко або плавлений сир необхідно використовувати гвинтові насоси; поршневі насоси використовуються як вимірювальні або в якості дозаторів; мембранні насоси необхідно використовувати для перекачування сирного зерна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Єресько Г. О. Технологічне обладнання молочних виробництв: навч. посібник / Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Ворощук. – К.: ІНКОС Центр навч. л-ри, 2007. – 344 с.

2. Сосновський М. В. Технологічне обладнання молочних виробництв: Навчальний посібник. / М. В. Сосновчький, Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Волощук. – Київ: ІНКОС. Центр навч. Літ-ри, 2007. 344 с.

3. Олабоді О. В. Технологія молока і молочних продуктів : Електронний ресурс. – Київ: Нац. ун-т харч. технол., 2017. 28 с. : http://library.nuft.edu.ua

4. Синявський О. Ю. Електропривод і автоматизація: навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, І. П. Ільїчов, Ю. М. Хандола. Київ: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.

УДК 631.4:621.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ ТА РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА

Чорна М. О., к.т.н., доц., e-mail: masher1533@gmail.com
Буклей А. О., студ., e-mail: andrej.buka33@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу одним із головних завдань є підвищення ефективності післязбиральної обробки та транспортування сільськогосподарської продукції. Коренеплоди (буряк, морква, ріпа, редька, картопля тощо) становлять значну частку врожаю сільськогосподарських культур і потребують делікатного транспортування, оскільки мають високу схильність до механічних пошкоджень. Під час подачі, перевантаження та сортування на виробничих лініях часто виникають удари, стискання та тертя, що призводить до зниження якості продукції, втрати маси та скорочення терміну зберігання.

Традиційні механічні конвеєрні системи, які широко використовуються на підприємствах харчової та переробної промисловості, часто не забезпечують стабільної роботи в умовах змінного навантаження. Відсутність автоматичного регулювання швидкості руху стрічки або подачі сировини призводить до перевантажень, заторів, підвищеного енергоспоживання та нерівномірного потоку коренеплодів. Крім того, ручне керування або використання простих електромеханічних схем не дозволяє адаптувати систему до різних режимів роботи, що обмежує продуктивність та надійність технологічного процесу..

Мета дослідження – дослідити процес транспортування коренеплодів і розробити автоматизовану систему керування електроприводом конвеєра, що забезпечує задані технологічні параметри (швидкість, подача, м’якість подачі) та мінімізує ушкодження продукції.

Основні матеріали досліджень. Застосування автоматизованих систем керування електроприводом у транспортних механізмах агропромислових підприємств відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності, точності дозування, стабільності подачі продукції та зниження рівня ушкоджень. Використання сучасних електроприводів із частотним регулюванням дозволяє забезпечити плавний запуск, зміну швидкості в реальному часі залежно від навантаження, а також реалізацію адаптивних алгоритмів керування, що підвищують надійність технологічних ліній.

Особливої уваги заслуговує розробка інтелектуальних систем керування, здатних у режимі реального часу аналізувати параметри руху, навантаження та стан обладнання за допомогою датчиків швидкості, моменту, вібрації та оптичних сенсорів. Такі системи сприяють зменшенню простоїв, автоматичному виявленню відхилень у роботі та підвищенню якості готової продукції [1].

Розвиток електроприводів змінного струму з частотним регулюванням швидкості відкрив широкі можливості для створення автоматизованих систем керування транспортними механізмами. Застосування перетворювачів частоти (інверторів), таких як Siemens SINAMICS V20, Schneider Electric Altivar ATV320 або Delta VFD-E, дає змогу реалізувати плавний пуск двигуна, стабілізацію швидкості за зміни навантаження, а також енергозбереження за рахунок оптимізації робочих режимів.

Автоматизована система керування електроприводом конвеєра дозволяє регулювати подачу матеріалу в залежності від поточного стану лінії, зменшуючи ймовірність утворення заторів або простоїв. Використання датчиків навантаження, швидкості та положення, а також контролерів типу Siemens LOGO! 8, Omron CP1E, Arduino Mega або STM32, забезпечує високий рівень адаптивності системи. На основі отриманих сигналів система може автоматично змінювати швидкість транспортування, оптимізуючи роботу в режимі енергозбереження.

Додатковим напрямом підвищення ефективності є впровадження інтелектуальних алгоритмів керування, що використовують пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД) регулятори або нечітку логіку для стабілізації швидкості конвеєра. Це дозволяє забезпечити сталість параметрів транспортування навіть при зміні фізико-механічних властивостей коренеплодів, коливаннях маси або зволоженості [2].

Таким чином, актуальність дослідження полягає у створенні енергоефективної, надійної та адаптивної автоматизованої системи керування електроприводом конвеєра, яка забезпечує оптимальні режими транспортування коренеплодів. Її впровадження дозволить:

- підвищити продуктивність технологічних ліній;
- зменшити втрати сировини внаслідок механічних пошкоджень;
- знизити енергоспоживання;
- продовжити термін служби електродвигунів і конвеєрних механізмів;
- автоматизувати контроль та діагностику процесу транспортування.

Розробка таких систем має важливе значення для підприємств переробної, харчової та аграрної галузей, оскільки сприяє реалізації концепції «розумного виробництва» (Smart Agriculture / Industry 4.0), що передбачає широке використання сенсорів, мікропроцесорів і засобів автоматизації для підвищення ефективності та якості виробництва [3, 4].

Під час побудови математичної моделі електропривода було прийнято низку спрощень і припущень.

По-перше, вважається, що частотний перетворювач, який функціонує в замкнутій системі керування за швидкістю, забезпечує плавне регулювання частоти живлення двигуна. Це дає змогу двигуну працювати на лінійній ділянці механічної характеристики, тобто в діапазоні зміни моменту навантаження від нуля до номінального значення та ковзання від нуля до номінального.

По-друге, інерційність датчика швидкості приймається настільки малою, що її впливом на динамічні властивості системи можна знехтувати.

Виходячи з наведених припущень, для подальшого моделювання складено структурну схему електропривода, що відображає роботу системи керування з частотним перетворювачем у складі замкнутої двоконтурної системи підлеглого керування – із внутрішнім контуром регулювання струму та зовнішнім контуром регулювання швидкості [5].

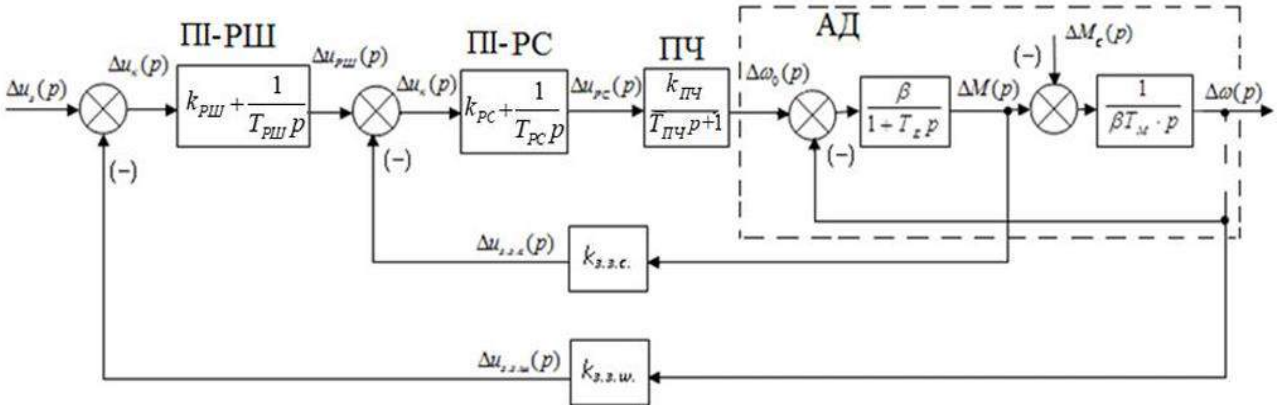


Рисунок 1 – Структурна схема електропривода конвеєра

Алгоритм роботи системи:

На вхід подається сигнал заданої швидкості → ПІ-регулятор швидкості порівнює її з виміряною швидкістю → На основі відхилення формується сигнал струму для внутрішнього контуру → Струмовий регулятор керує частотним перетворювачем, який регулює напругу та частоту на вході двигуна → Двигун змінює швидкість, а сигнал датчика знову надходить до регулятора - відбувається зворотний зв’язок.

Переваги структурної схеми системи автоматичного керування електроприводом:

1. Забезпечує високу точність регулювання швидкості завдяки наявності внутрішнього контуру струму та зовнішнього контуру швидкості.

2. Наявність швидкодіючого струмового регулятора дозволяє компенсувати вплив змін навантаження в реальному часі.

3. Частотний перетворювач дає змогу змінювати частоту живлення двигуна без ривків і перевантажень.

4. Оптимізація струму двигуна через внутрішній контур дозволяє знизити втрати енергії та підвищити ККД системи.

5. У схемі легко інтегруються PID-регулятори з автоматичним налаштуванням параметрів під конкретне навантаження.

6. Кожен елемент (контур струму, контур швидкості, датчики) може бути замінений або доповнений без суттєвої зміни архітектури системи.

Можливості приведеної структурної схеми:

1) Точне підтримання швидкості обертання двигуна при змінному навантаженні.

2) Швидке реагування на відхилення завдяки внутрішньому струмовому контуру.

3) Можливість моделювання і дослідження динамічних процесів у MATLAB/Simulink.

4) Автоматизований контроль і діагностика, що підвищує надійність системи.

5) Інтеграція із сенсорами та PLC, що робить систему придатною для промислових і аграрних транспортних механізмів (наприклад, конвеєрів для транспортування коренеплодів).

Аналіз результатів моделювання показав, що використання ПІ-регуляторів у контурах струму та швидкості забезпечує мінімальний час перехідного процесу й відсутність перерегулювання, що є оптимальним для автоматизованих систем транспортування коренеплодів.

Висновок. Створення енергоефективної, надійної та адаптивної автоматизованої системи керування електроприводом конвеєра, що забезпечує оптимальні режими транспортування коренеплодів, мінімізацію механічних пошкоджень, зниження втрат продукції та підвищення ефективності виробничих процесів у агропромисловому секторі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гевко Р. Б., Синій С. В. , Паньків М. Р., Варголяк М. А. Розробка та аналіз роботи машин для енергоощадних технологій збирання коренебульбоплодів. / Вісник інженерної академії України, № 3-4. Київ : 2014. С. 46-52.

2. Регульований електропривод: Підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко; За ред. І. М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.

3. Ляшук О. Л. Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання / О. Л. Ляшук, Р. Б. Гевко, В. О. Дзюра, О. М. Кирик, А.П. Довбиш. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – 167 с.

4. Царенко О. М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / О. М. Царенко, Д. Г. Войтюк, М. В. Швайко та ін.; під ред. С. С. Яцуна. Київ : Мета, 2003. 448 с.

5. Гераїмчук М. Д. Моделювання систем у середовищі MATLAB SIMULINK: Комп’ютерний практикум / М. Д. Гераїмчук, Ю. Ф. Лазарєв, Т. О. Толочко. – К.:, 2006. – 175 с.

УДК 621

РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ТЕПЛОВОДОПОСТАЧАННЯ ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ

Чорна М. О., к.т.н., доц., e-mail: masher1533@gmail.com
Кондрашов В. С., студ., e-mail: kondrashovv@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В сучасних умовах підвищення енергоефективності та автоматизації технологічних процесів на тваринницьких фермах особливого значення набуває створення систем регульованого електропривода для тепловодопостачання. Традиційні нерегульовані системи споживають надлишкову електроенергію, мають низький коефіцієнт корисної дії та не забезпечують стабільної температури теплоносія і тиску в системі.

Використання частотно-регульованих електроприводів насосів і вентиляторів дозволяє автоматично підтримувати оптимальні параметри подачі води та повітря, що безпосередньо впливає на комфорт тварин, їх продуктивність і зниження енергоспоживання.

Мета дослідження – розробити систему регульованого електропривода для забезпечення ефективного, енергоощадного та надійного функціонування систем тепло- і водопостачання тваринницької ферми.

Основні матеріали досліджень. Метою даного дослідження є розробка системи регульованого електропривода для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи систем тепло- і водопостачання тваринницької ферми. Така система має забезпечувати автоматичне підтримання необхідних технологічних параметрів – тиску, витрати та температури води, що подається до поїлок, систем обігріву чи вентиляції.

Передбачено створення математичної моделі електропривода, який працює у складі системи автоматичного керування з частотним перетворювачем. Розроблена модель дозволяє дослідити вплив параметрів регулювання на динаміку та стабільність роботи системи. Для керування швидкістю електродвигуна застосовується двоконтурна структура підлеглого регулювання – із внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості, що забезпечує високу точність і швидкодію системи.

Особлива увага приділяється оптимізації параметрів регуляторів для досягнення мінімальних енергетичних втрат при збереженні стабільності процесу постачання тепла та води. Розроблена система дозволяє автоматично адаптуватися до змін навантаження, що є типовим для фермерських господарств у різні періоди доби чи сезони [1].

Системи регульованого електропривода забезпечують ефективне, стабільне та енергоощадне функціонування систем тепло- і водопостачання тваринницької ферми. Такі системи є ключовою складовою технологічного процесу на фермах, оскільки стабільна подача теплоносія та води безпосередньо впливає на мікроклімат у приміщеннях, здоров’я та продуктивність тварин.

У традиційних схемах тепло- і водопостачання електроприводи насосів працюють у режимі постійної швидкості, що призводить до надмірного енергоспоживання, перевантажень системи, частих поломок обладнання та відсутності гнучкості в регулюванні технологічних параметрів. Тому впровадження регульованих електроприводів із частотними перетворювачами дозволяє оптимізувати роботу насосного обладнання залежно від поточних умов і потреб системи. Це забезпечує автоматичне керування тиском, витратою води та температурою, а також значне зниження витрат електроенергії.

У межах цього дослідження проводиться моделювання електропривода в середовищі MATLAB Simulink, що дає змогу дослідити процеси регулювання та перевірити ефективність запропонованої структури керування без проведення дорогих експериментів на реальному обладнанні. При цьому враховується інерційність елементів системи, нелінійність характеристик навантаження, а також вплив збурень, що виникають унаслідок зміни споживання води чи температури навколишнього середовища [2].

У моделі використовується двоконтурна система підлеглого регулювання – із внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості або тиску. Така структура забезпечує високу точність і швидкодію регулювання, що є особливо важливим для стабільного функціонування системи тепловодопостачання. Розроблена схема дозволяє підтримувати задані параметри незалежно від змін навантаження, зберігаючи плавність переходів і запобігаючи гідроударам.

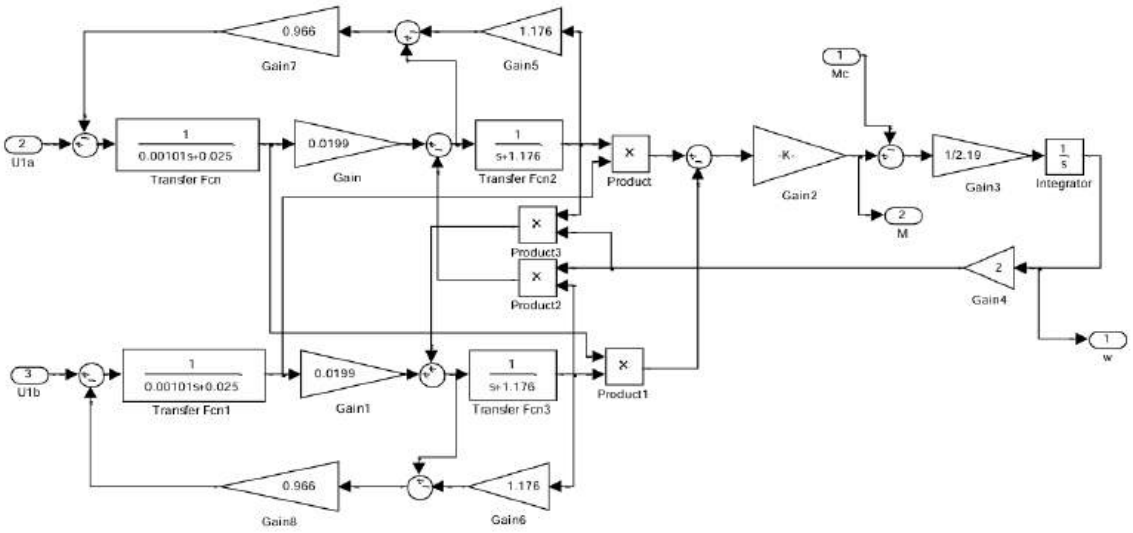


Рисунок 1 – Структурна схема електропривода для тепловодопостачання тваринницької ферми в середовищі MATLAB Simulink

Під час дослідження було проаналізовано роботу системи за різних режимів – пуск, номінальне навантаження, зниження споживання – та встановлено, що використання частотно-регульованого електропривода дозволяє зменшити споживання електроенергії на 25–40 % у порівнянні з нерегульованими системами. Крім того, знижується рівень вібрацій, шуму та зношування елементів насосного обладнання.

Висновок. Розроблена математична модель електропривода у середовищі MATLAB Simulink дозволила дослідити динамічні характеристики системи, визначити вплив основних параметрів регулювання на стабільність роботи та підібрати оптимальні коефіцієнти регуляторів. Застосування двоконтурної системи підлеглого регулювання – із внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості або тиску – забезпечує високу точність і швидкодію керування, що дозволяє підтримувати сталий режим роботи системи навіть за змінних умов навантаження. Отримані результати показали, що використання частотно-регульованого електропривода дає змогу зменшити споживання електроенергії в середньому на 25–40 %, підвищити стабільність параметрів теплоносія, а також знизити рівень механічних навантажень на насосні агрегати. Це, в свою чергу, подовжує термін служби обладнання та зменшує витрати на технічне обслуговування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Видмиш А. А. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.

2. Гераїмчук М. Д. Моделювання систем у середовищі MATLAB SIMULINK: Комп’ютерний практикум / М. Д. Гераїмчук, Ю. Ф. Лазарєв, Т. О. Толочко. – К., 2006. – 175 с.

УДК 621

РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ

Чорна М. О., к.т.н., доц., e-mail: masher1533@gmail.com
Несміян Р. О., студ., e-mail: nesmijan@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасне тваринництво потребує стабільного мікроклімату, який забезпечує оптимальні умови для росту, відтворення та продуктивності тварин. Одним із ключових факторів підтримання мікроклімату у приміщеннях є ефективна система вентиляції, яка регулює температуру, вологість і газовий склад повітря. В більшості тваринницьких ферм вентиляційні установки працюють у нерегульованому режимі, тобто з постійною швидкістю обертання вентиляторів, що призводить до перевитрати електроенергії, шуму, зносу обладнання та неефективного використання ресурсів.

Використання систем регульованого електропривода з частотними перетворювачами дозволяє автоматично змінювати швидкість вентиляторів відповідно до поточних умов мікроклімату (температури, вологості, концентрації газів), що забезпечує енергозбереження, стабільність параметрів повітряного середовища та підвищення комфорту тварин.

Мета дослідження – розробка системи регульованого електропривода вентиляційної установки тваринницької ферми, що забезпечує автоматичне підтримання оптимальних параметрів мікроклімату при мінімальних енерговитратах.

Основні матеріали досліджень. Розробка системи регульованого електропривода вентиляційної установки тваринницької ферми є одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва. D сучасних умовах експлуатації тваринницьких комплексів вентиляційні системи споживають значну частину електроенергії, а їх нераціональна робота призводить до перевитрат ресурсів і погіршення мікроклімату. Саме тому впровадження автоматизованих систем регулювання, здатних адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища, є важливим технічним завданням.

У тваринницьких приміщеннях якість повітря визначає фізіологічний стан тварин, їхню продуктивність, приріст маси та стійкість до захворювань. Надмірна вологість, висока концентрація аміаку або вуглекислого газу, а також дефіцит кисню можуть призводити до значних економічних втрат. Традиційні системи вентиляції часто працюють у фіксованому режимі, без урахування реальних параметрів повітряного середовища, що є неефективним і призводить до зносу обладнання.

Система автоматичного регулювання швидкості вентилятора повинна враховувати зміни мікрокліматичних параметрів – температури, вологості та концентрації вуглекислого газу. Реалізація такого підходу дозволяє підтримувати оптимальні умови утримання тварин і одночасно мінімізувати споживання електроенергії.

У процесі роботи проведено аналіз існуючих систем вентиляції та визначено їх основні недоліки, зокрема відсутність можливості плавного регулювання швидкості обертання двигуна та низьку енергоефективність при роботі в режимі постійної швидкості. Для усунення цих недоліків запропоновано систему регульованого електропривода з використанням частотного перетворювача, який дозволяє змінювати частоту живлення асинхронного двигуна відповідно до сигналів від датчиків температури і вологості [1, 2].

Під час розробки математичної моделі електропривода зроблено кілька спрощень, що дозволяють зосередитись на основних процесах керування. Частотний перетворювач розглядається як елемент, здатний плавно регулювати частоту струму в широкому діапазоні, забезпечуючи роботу двигуна на лінійній ділянці механічної характеристики. При цьому вважається, що датчики температури та швидкості мають малу інерційність і не впливають суттєво на динаміку системи.

На основі прийнятих допущень побудовано структурну схему системи регульованого

електропривода у середовищі MATLAB Simulink. Система має двоконтурну структуру керування: внутрішній контур відповідає за стабілізацію струму, а зовнішній – за підтримання необхідної швидкості вентилятора. Такий підхід дозволяє досягти високої точності регулювання, стійкості системи та швидкого реагування на зміну навантаження або параметрів повітря в приміщенні.

Отримана модель дозволяє проводити моделювання перехідних процесів і досліджувати вплив зміни параметрів регулювання на енергоефективність роботи вентиляційної системи. Застосування частотного регулювання дає можливість зменшити витрати електроенергії на 20–30 % у порівнянні з нерегульованими приводами, а також подовжити термін служби двигуна завдяки зменшенню пускових струмів.

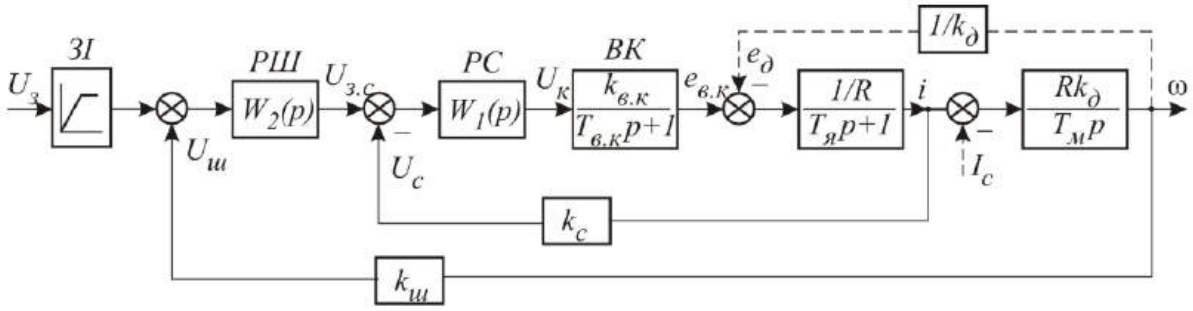


Рисунок 1 – Структурна схема регульованого електропривода у середовищі MATLAB Simulink

Перевагами запропонованої схеми є висока точність підтримання швидкості, можливість інтеграції з автоматизованою системою керування мікрокліматом ферми, адаптація до різних режимів роботи та зниження експлуатаційних витрат. Крім того, використання MATLAB Simulink забезпечує гнучкість моделювання і можливість подальшого удосконалення алгоритмів керування, наприклад, шляхом впровадження ПІД-регуляторів або нечітких логічних систем.

У результаті виконаного дослідження створено концепцію енергоефективної, надійної та автоматизованої системи регульованого електропривода вентиляційної установки тваринницької ферми, яка здатна адаптуватися до змінних умов експлуатації, підвищує продуктивність обладнання та сприяє покращенню умов утримання тварин [2].

Висновок. Проведені дослідження підтверджують, що впровадження регульованого електропривода вентиляційної установки є доцільним як з технічної, так і з економічної точки зору. Енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат, покращення умов утримання тварин та можливість автоматизованого керування роблять таку систему перспективною для широкого впровадження у сільськогосподарському виробництві.

Таким чином, розроблена система регульованого електропривода вентиляційної установки тваринницької ферми забезпечує оптимальне поєднання точності, надійності та економічності, відповідає сучасним вимогам автоматизації та сталого розвитку аграрної галузі, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності виробництва і якості продукції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електропривод: Навч. посіб. / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 316 с.: іл.

2. Голодний І. М., Санченко О. В. Г / Регульований асинхронний електропривод вентиляційної системи з широтно-імпульсним керуванням. – К.: ТОВ ЦП "Компринт", 2020. – 117 с.: іл.

УДК 621.316.21

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Шевченко П. С., бакалавр, e-mail: shevcenten@gmail.com
Гузенко В. В., к.т.н., доц., e-mail: hnaghv@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. На сьогодні відомо п’ять методів отримання рівнянь динаміки багатоланкових виконавчих механізмів [1]:

- метод Лагранжа, заснований на рівняннях Лагранжа ІІ роду й описі кінематики системи матрицями однорідних перетворень координат;
- модифікований метод Лагранжа, заснований на рівняннях Лагранжа ІІ роду й рекурентному описі кінематики механічної системи;
- метод Ейлера, заснований на застосуванні другого закону динаміки та принципу Д’Аламбера;
- метод Гауса, заснований на принципі найменшого примушування;
- метод зв’язкових графів.

Як показують результати аналізу, методи Лагранжа та Ейлера є найпоширенішими на практиці. Тому що складання рівнянь руху для механічних систем методом Лагранжа відрізняється простотою та єдністю підходу, а самі рівняння, що отримані цим методом, забезпечують опис динаміки й можуть бути використані для розробки законів керування у просторі приєднаних змінних. Вирази для кінетичної та потенційної енергії ланок записують відносно координат ланок у нерухомій системі координат [1]. А головні рівняння динаміки у формі Лагранжа потрібно скласти для електричної системи. Великою перевагою методу Лагранжа є можливість застосовувати його для виведення рівнянь руху механічних систем, що містять замкнуті контури.

Мета дослідження – аналіз методів динаміки електромеханічних систем багатоланкових виконавчих механізмів що містять замкнуті контури.

Основні матеріали досліджень. Застосування методу Ейлера приводить до системи прямих і зворотних рекурентних рівнянь, послідовно застосованих до ланок механічної системи [2]. Цей метод найефективніший з обчислювальної точки зору, що дає змогу використовувати його для керування системою в реальному часі і для моделювання її рухів на комп’ютері. Перевагою методу Ейлера є також можливість обчислювати сили та моменти сил реакцій у кінематичних парах механізму. З точки зору аналізу, рекурентні співвідношення не є зручними. Тому метод Ейлера практично не застосовується в задачах синтезу законів керування.

Модифікований метод Лагранжа дозволяє отримати рівняння динаміки у векторно-матричній формі, зручній для аналізу. Крім того, ці рівняння забезпечують зниження обчислювальних витрат на розрахунок динамічних коефіцієнтів порівняно з рівняннями Лагранжа. З використанням коефіцієнтів є можливість розрізняти динамічні ефекти, що обумовлені обертальним і поступальним рухом ланок. Це необхідно використовувати під час синтезу керування у просторі станів систем. Обчислювальна ефективність цих рівнянь обумовлена використанням для опису кінематики ланок матриць поворотів і векторів відносного положення. Використання модифікованого методу Лагранжа для аналізу систем, що містять замкнуті кінематичні контури, пов’язане з труднощами, тому що даний метод передбачає рекурентні обчислювальні процедури.

Метод, заснований на принципі Гауса, на відміну від методів, заснованих на рівняннях Лагранжа, дає змогу отримувати рівняння динаміки механічних систем, як з голономними, так і з неголономними зв’язками. При використанні принципу Гауса завдання зводиться до визначення прискорень істинного руху. Це досягається шляхом чисельної мінімізації примушування як функції узагальнених прискорень механічної системи методом динамічного програмування або невизначених множників Лагранжа. Безсумнівною

перевагою методу Гауса можна вважати можливість його застосування для дослідження руху механічних систем із неврегульованими зв'язками.

Висновок. Перевага методу Гауса досягається саме в тих випадках, коли використовуються чисельні методи мінімізації примушування на кожному кроці інтегрування рівнянь динаміки.

Метод зв'язкових графів ґрунтується на поданні системи (механічної, електричної, гідравлічної або комбінованої) у вигляді деякого кінцевого числа елементів, що мають формальний математичний опис і з'єднаних один з одним у загальну структуру за допомогою зв'язків.

Математична модель динаміки системи відображається у вигляді схеми (графа), на підставі якої виводяться рівняння динаміки, при цьому механічна частина системи може бути неголономною. Головною перевагою методу зв'язкових графів є структурно-графічне представлення динаміки досліджуваних систем, що дає змогу простежити всі взаємовпливи елементів системи візуально й отримати рівняння динаміки шляхом застосування до зв'язкового графу простих законів Кірхгофа. Використання методу зв'язкових графів дає найбільший ефект при описі, аналізі та проектуванні розгалужених систем з наявністю замкнених кінематичних контурів.

Результати порівняльного аналізу (табл. 1) свідчать про те, що найперспективнішим з точки зору автоматизації моделювання динаміки електромеханічних систем є метод зв'язкових графів. Цей метод, з одного боку, має найбільшу спільність і необхідну інваріантність до фізичної природи об'єктів дослідження.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз методів динаміки електромеханічних систем

Метод	Механічні системи			Електричні системи	Результат обчислень		
	голономні	неголономні	із замкненими контурами		замкнена система диферен-ційного рівняння	рекурентне рівняння	числе-ний
Лагранжа модифікований	+	–	+ –	+	+	–	–
Ейлера	+	–	–	–	–	+	–
Гауса	+	+	+	–	–	–	+
зв'язкових графів	+	+	+	+	+	–	–

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chioncel, C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. (2015). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. International Conference on Applied Sciences, 1 – 6 DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005

2. B. Pakkiraiah, G.D. Sukumar.(2016). A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive. Indian Journal of Science and Technology, 9(45), 1–10 DOI: https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313

СЕКЦІЯ 4. БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 004.9:61

MARKET RESEARCH ON MOBILE APPLICATIONS FOR MEDICATION MANAGEMENT

Datsok Y., Student, e-mail: yevheniia.datsok@nure.ua
Yakovleva O., Ass. Prof., Cand. of Tech. Sc., e-mail: olena.yakovleva@nure.ua
Kharkiv National University of Radio Electronics

Relevance of the study. In the current context of digital transformation in healthcare, there has been active development of mobile health technologies (mHealth), which cover a wide range of solutions – from patient monitoring systems to applications for controlling drug therapy [1]. The growing number of users of such services indicates an increase in trust in digital tools in the field of medicine. One of the most dynamic areas of the market is applications for drug analysis and medication management, which help users control their medication intake, track their home medicine cabinet supplies, and check for drug interactions [2]. Despite the significant number of solutions, most of them have limited functionality, are not integrated with medical registries, and rarely use artificial intelligence technologies [3]. The Ukrainian market is dominated by information and commercial platforms (Tabletki.ua, Liki24, Apteki.ua), while intelligent solutions with automatic drug analysis remain rare [1, 3].

Research objective. The objective of this work is to conduct a comprehensive analysis of the current market for mobile applications focused on drug management and user health monitoring. Such an analysis provides a deeper understanding of trends in the mHealth segment and identifies opportunities for its further improvement from the perspective of biomedical engineering.

The study covers the main trends in market development, analysis of existing functional solutions and technologies used in medical applications, and assessment of their technological maturity. Particular attention is paid to identifying key categories of software products related to medicines, such as applications for managing home medicine cabinets, medication managers, search and booking services, reference systems, and comprehensive medical platforms. In addition, the study aims to identify factors affecting the competitiveness of such solutions, analyse their technological and regulatory features, and outline the prospects for integrating artificial intelligence and computer vision technologies into the field of medication management. The ultimate goal is to formulate general conclusions and recommendations for the further development of mobile medical services both in Ukraine and on the international market.

Main research materials. The conducted analysis demonstrated that the modern market for mobile health applications (mHealth) is expanding rapidly and encompasses several core areas that differ in their purpose, functionality, and degree of technological integration. Despite a large number of available products, most existing applications remain narrowly focused, addressing isolated aspects of medical information management and lacking a comprehensive, intelligent approach to handling data on medicines and treatment processes through artificial intelligence technologies.

Home medicine cabinet managers. This category includes applications such as Liki Kontrol, MyCabinet, and other similar solutions designed to help users organise and monitor the contents of their home medicine supplies. Their core features include maintaining an inventory of medications, recording expiry dates, and providing simple notifications for restocking. These solutions are practical for everyday use; however, they have several notable limitations – in particular, the absence of automatic recognition of drug names, barcode or label scanning, and the inability to generate structured summaries or reference data based on the scanned information. This limits their potential for integration with more advanced digital health systems.

Searching for and booking medicines. Platforms such as Tabletki.ua, Apteki.ua, Liki.ua, and GoodRx represent a separate commercial segment of the market. Their primary objective is to simplify access to pharmacy networks, allowing users to compare prices and check the availability of medicines across various chains. Although these applications are highly useful for consumers

seeking cost optimisation and convenience, they are generally not designed to support personal medication tracking, interaction checking, or integration with electronic health records.

Medication reminders. Applications such as MyTherapy and Medisafe focus on improving medication adherence by providing reminders, logging drug intake, and tracking treatment progress. Some of these applications also allow users to generate reports for healthcare providers, enhancing the quality of communication between patients and clinicians. However, most solutions remain limited to basic reminder functions and are not integrated with official medical databases, electronic medical records, or artificial intelligence tools for therapy analysis.

Medical reference guides and diagnostic applications. This group includes Ada Health, Smart Pill ID, and other similar systems that provide users with comprehensive reference data on medicines – their composition, indications, contraindications, and possible interactions. Certain applications employ computer vision algorithms for the visual recognition of drugs from photos of packaging or tablets, which marks an important technological advancement. However, these functions are still in early development, often restricted to English-language users, and lack regulatory validation. This area demonstrates the highest potential for the implementation of artificial intelligence, including large language models (LLMs), for the automated extraction and interpretation of information from drug instructions and clinical documentation.

Comprehensive medical platforms. Large digital health ecosystems such as Helsi and Doc.ua combine multiple services – doctor appointment scheduling, teleconsultations, electronic health records, and access to laboratory results. While they are intended primarily for clinical and administrative use, these systems currently do not provide tools for managing personal or home medication inventories, which limits their applicability in individual medicine management.

Overall, the analysis confirms that the mHealth market remains highly fragmented: there are numerous specialised solutions for recording, searching, or reminding, but virtually no integrated systems that combine these capabilities with advanced text and image analysis. The ongoing progress in computer vision, natural language processing (NLP), and large language model technologies opens promising opportunities for developing intelligent medication-management ecosystems. Such systems could significantly enhance patient safety, convenience, and adherence, forming an important step toward the digital transformation of personalised healthcare.

Conclusion. The analysis showed that the market for mobile applications for managing medicines is actively developing, but remains fragmented and uneven in terms of technological maturity. Most solutions focus only on individual functions – reminders, search or medication tracking – without comprehensive data integration. There is a need to create multifunctional intelligent systems that would combine first aid kit management, automatic drug recognition, interaction verification, and integration with electronic medical records. This approach opens up prospects for the development of innovative solutions based on artificial intelligence, computer vision, and natural language processing technologies.

The results obtained can be used to improve mobile services in the field of mHealth, develop technical recommendations and further research in the field of biomedical engineering.

REFERENCES

1. Assessment of medication adherence using mobile applications in chronic obstructive pulmonary disease: a scoping review / B. Machado et al. *International journal of environmental research and public health*. 2024. Vol. 21, no. 10. P. 1265. URL: https://doi.org/10.3390/ijerph21101265 (date of access: 30.10.2025).

2. Effect of using a mobile drug management application on medication adherence and hospital readmission among elderly patients with polypharmacy: a randomized controlled trial / H. Poorcheraghi et al. *BMC health services research*. 2023. Vol. 23, no. 1. URL: https://doi.org/10.1186/s12913-023-10177-4 (date of access: 30.10.2025).

3. Mobile apps for medication management: review and analysis / K. Tabi et al. *JMIR mHealth and uHealth*. 2019. Vol. 7, no. 9. P. e13608. URL: https://doi.org/10.2196/13608.

4. Quality assessment of smartphone medication management apps in France: a systematic research (Preprint) / M. Toïgo et al. *JMIR mHealth and uHealth*. 2023. URL: https://doi.org/10.2196/54866 (date of access: 30.10.2025).

UDC 636.09: 681.586.5: 620.3

PORTABLE BIOSENSOR BASED ON NANOMATERIALS FOR EXPRESS DIAGNOSTICS OF INFECTIONS IN FARM ANIMALS

Kosulina Natalia[1], Doctor of Technical Sciences, Prof., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Evstatiev Boris[2], PhD, Prof., e-mail: bevstatiev@uni-ruse.bg
[1] State Biotechnological University
[2] «Angel Kunchev» University of Ruse, Bulgaria

Relevance of the research. Infectious animal diseases remain one of the main problems of modern animal husbandry, as they can lead to significant economic losses and reduced productivity [1]. Traditional methods of laboratory diagnostics – bacteriological, serological and molecular biological – provide high accuracy but require specialized equipment, qualified personnel and a long time to obtain results. Therefore, portable biosensors are gaining increasing attention, which allow for rapid analysis directly on farms or in veterinary clinics. The use of nanomaterials, in particular gold nanoparticles (AuNPs) and graphene oxide (GO) which provide high electrical conductivity, stability and biocompatibility, has particular potential.

The aim of the work is to analyze research in the field of creating nanomaterial-oriented biosensors and mobile diagnostic systems and to develop a biosensor device capable of quick detecting infectious agents in biological fluids. It is proposed to use gold nanoparticles and graphene oxide as electrode materials, which allow achieving high signal sensitivity and stability of the sensor operation.

Main research materials. In the article [2], it is shown that modern biosensor devices using antibodies, aptamers or DNA probes associated with transducers (electrochemical, optical or colorimetric) can provide rapid and specific recognition of pathogens in livestock. The article [3] shows that decorating graphene with gold nanoparticles (AuNPs) allows high sensitivity and selectivity to be achieved in complex biological environments (serum) when detecting microRNAs.

In the article [4], it is shown that the AuNP-DNA biosensor can detect DNA of the bacterial pathogen *Salmonella enterica* without using PCR amplification, even in matrices with impurities – this is an important step towards simplifying sample preparation. In the article [5], it is shown that an aptamer biosensor with AuNP allows for selective and relatively fast detection of EPEC (enteropathogenic *E. coli*), which can potentially be adapted for field conditions. It is shown that the combination of nanomaterials (AuNP, rGO, graphene, metal oxides) significantly increases the active surface area, electronic conductivity and, as a result, the sensitivity and speed of the reaction; the use of aptamers or DNA/RNA probes makes it possible to avoid the use of antibodies in some cases, which can reduce the cost and increase the stability of bioreceptors; modern research has achieved detection levels that already rival or approach PCR levels (*Salmonella* biosensors).

But there are some issues related to the stability of bioreceptors under fluctuating temperatures and storage conditions, especially in field conditions; signal interference due to impurities (proteins, fats, salts in the blood) – matrix effects that can give a background signal or reduce sensitivity; the need for complex and expensive sample preparation or enrichment of target samples before analysis; the lack of a sufficient number of portable devices that have been validated not only in laboratory conditions but also in real livestock facilities; the consumable part – materials (gold nanoparticles, graphene, enzymes, aptamers), production, calibration, and ensuring readiness for field use.

The reason for this may be objective difficulties associated with quality control and reproducibility of nanomaterials, their morphology; degradation of bioreceptors through environment and time; the need for expensive components in large-scale production; the difficulty of ensuring conditions that would minimize background interference in the field (cleanliness, processing). An option for overcoming these difficulties may be the use of aptamers or stabilized synthetic probes that better tolerate extreme conditions; application of nanomaterial composites that provide both large surface area and stability (AuNP + rGO or AuNP + MXene); modular design of

the device with built-in sample processing (filtration, purification, buffering) to reduce matrix effects; integration with portable electronic equipment / smartphone interfaces to minimize size and cost; standardization of validation methods on different samples (milk, blood, saliva) and under different environmental conditions. This is the approach used, for example, in the article [2], where the need for portable, multi-target devices capable of working directly on the farm is discussed, but in practice most systems remain laboratory-based.

All this allows us to argue that it is advisable to conduct research dedicated to the development of a portable nanomaterial-enhanced biosensor for rapid diagnosis of infections in farm animals, which combines: highly sensitive nanomaterials; stable bioreceptors; sample processing module; portable electrochemical or FET transducer; field trials and validation in farm conditions.

The principle of operation of the electrochemical biosensor and the mathematical model of the biosensor response are presented in Fig. 1 and formulas (1 – 4).

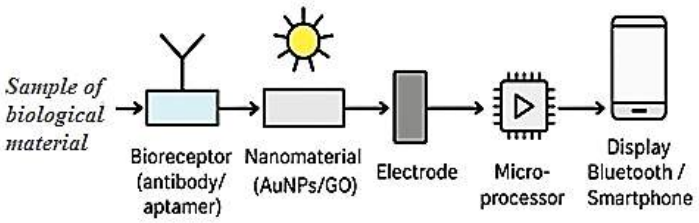


Fig. 1 – Structural diagram of the biosensor

When antigen (Ag) interacts with antibody (Ab) immobilized on the electrode surface, a specific complex is formed: Ab+Ag↔Ab–Ag. This reaction leads to a change in the impedance (resistance) of the electrode system, which is recorded by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The amount of electric charges Q passing through the electrode during the reaction is directly proportional to the amount of substance n participating in the process:

$$Q = n \cdot F \cdot z, \tag{1}$$

where F – Faraday constant (96,485 C/mol), z – the number of electrons participating in the reaction.

To describe an electrochemical reaction, the Randles equivalent circuit is often used, which includes a series connection of resistances and capacitances:

$$Z(\omega) = R_s + \frac{1}{1/R_{ct} + j\omega C_{dl}} + Z_W, \tag{2}$$

where R_s – the solution resistance, R_{ct} – the charge transfer resistance, C_{dl} – the double layer capacitance, Z_W – the Warburg element (diffusion resistance).

The mechanism of signal amplification by gold nanoparticles occurs if the electrode surface is modified with AuNPs, antibodies are fixed on AuNPs due to binding to sulfhydryl groups, and after antigen binding, the conductivity of the AuNPs layer changes, increasing or decreasing the impedance. This approach allows sensitivity of up to 10^{-12} M to be achieved.

The rate of antigen-antibody complex formation is described by the equation:

$$d[\text{Ab–Ag}]/dt = k_1 [\text{Ab}][\text{Ag}] - k_{-1}[\text{Ab–Ag}], \tag{3}$$

where k_1 – association constant, k_{-1} – dissociation constant.

At steady-state, the concentration ratio is described by the equilibrium constant:

$$K_d = [\text{Ab}][\text{Ag}]/[\text{Ab–Ag}]. \tag{4}$$

Small values of K_d correspond to the strong affinity of the antibody to the antigen, which increases the selectivity of the sensor.

The combination of gold nanoparticles and graphene oxide creates an active surface with a large specific area, which increases the efficiency of biomolecule immobilization and the sensitivity of the sensor. Gold provides high biocompatibility, and graphene provides good conductivity and mechanical stability. Antibodies to pathogens such as foot-and-mouth disease virus, *Salmonella spp.* and *Pasteurella multocida* are immobilized on the functionalized sensor surface. The method of activating carboxyl groups using EDC/NHS reagents is used, which ensures stable covalent binding of antibodies. The signal is determined by electrochemical impedance spectroscopy, which allows detecting impedance changes during the interaction of the antigen with the antibody. This method is sensitive, fast and suitable for portable systems.

It is expected that the developed sensor will have a sensitivity limit of 10^{-9}–10^{-12} M; analysis time – 10…15 min; the possibility of autonomous use in the field without complex equipment; low cost of analysis due to minimal costs for reagents. The implementation of such a device will ensure a rapid response to disease outbreaks and will allow for timely preventive measures. A biosensor for detecting foot-and-mouth disease virus based on gold nanoparticles and graphene oxide shows sensitivity to 10^{-11} M and can operate in field conditions without laboratory sample preparation. A graphene sensor for detecting *Salmonella spp.* provides data transmission via Bluetooth and conducts analysis in less than 10 minutes. An aptomer biosensor for pasteurellosis, developed in Belgium, detects *Pasteurella multocida* in animal blood in 8 – 10 minutes and has storage stability of up to 6 months. *Lab-on-a-Chip* microsystems, combining microfluidics and nanomaterials, allow for the simultaneous detection of multiple pathogens in a minimal sample volume.

Further research in this area includes: integrating sensors with mobile applications to collect and transmit results to cloud databases; creating multifunctional sensors capable of detecting multiple infectious agents simultaneously; using artificial intelligence to predict epizootic outbreaks based on sensor data analysis; reducing the cost of devices through large-scale production of nanostructured platforms. Such technology will become an important tool in the intelligent animal health monitoring system (Smart Veterinary Diagnostics).

Conclusion. The development of portable biosensors based on nanomaterials opens up new opportunities for veterinary diagnostics. The use of gold nanoparticles and graphene structures provides high sensitivity and speed of analysis, which allows the use of devices directly on farms. In the future, such systems can become part of integrated bioanalytical networks capable of preventing the spread of infections and increasing the level of biosecurity in livestock farming.

REFERENCES

1. Косуліна Н. Г. Результаты лечения мастита овцематок радиоимпульсными электромагнитными колебаниями крайневысокой частоты. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – Вип. 175. – 2016. – С. 156–158.

2. Holizadeh B., Gholizadeh S., Razzaghi R., Gholizadeh M. Advanced biosensors for detection of pathogens related to livestock and poultry // *Veterinary Research*. – 2017. – Vol. 48, № 1. – P. 71. – DOI: 10.1186/s13567-017-0472-y.

3. Huang Y., Yang X., Liu T., Lee K., Choi J. Gold nanoparticles-decorated graphene field-effect transistor biosensor for femtomolar MicroRNA detection // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2015. – Vol. 74. – P. 53–59. – DOI: 10.1016/j.bios.2015.06.012.

4. Kwon Y., Gopinath S.C. B., Kim S. W., Kim S. Detection of Non-PCR Amplified S. enteritidis Genomic DNA from Food Matrices Using a Gold-Nanoparticle DNA Biosensor: A Proof-of-Concept Study // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12, № 6. – P. 7260–7272. – DOI: 10.3390/s120607260.

5. Bavandpour P., Ghasemi J., Sasanpour M. Gold nanoparticles (AuNP)-based aptasensor for enteropathogenic Escherichia coli detection // *Molecular Biology Reports*. – 2022. – Vol. 49, № 3. – P. 2383–2392. – DOI: 10.1007/s11033-022-07137-z.

UDC 616.7-77:539.3

BIOMECHANICAL JUSTIFICATION OF THE SHAPE OF A HUMAN LOWER LIMB PROSTHETIC FOOT

Panchenko S. P., Cand. of Tech. Sc., Ass. Prof., e-mail: panchenko.s.p@nmu.one
Dnipro University of Technology
Datsok O. M., Cand. of Tech. Sc., Ass. Prof., e-mail: oleh.datsok@nure.ua
Kharkiv National University of Radio Electronics

Relevance of the study. In the context of modern biomedical engineering development, limb prosthetics represents one of the key fields that is rapidly advancing under the influence of progress in materials science, mechatronics, digital modeling, and biomechanics [1]. The issue of prosthetics is of particular importance in Ukraine, where the number of patients with amputations has significantly increased due to military actions, occupational injuries, road accidents, and chronic vascular diseases. Moreover, the situation in Ukraine has another crucial aspect: a large portion of prosthetic devices are imported from abroad, making them expensive and inaccessible to a significant number of patients.

Modern approaches to lower limb prosthetics focus not only on restoring the basic functions of gait but also on achieving the most natural biomechanics of movement, reducing the user's energy expenditure, and improving overall comfort during use [2].

One of the most important parts of the lower limb is the foot [3], which provides contact with the supporting surface, participates in the roll-over phase of gait, maintains balance, and absorbs impact loads. Therefore, the efficiency of the entire prosthesis and the patient's quality of life depend on the geometry of the foot module, the properties of its materials, and its kinematic characteristics.

An analysis of the literature [4, 5] shows that there is a wide variety of prosthetic foot designs – ranging from simple rigid models to high-tech bionic systems with microprocessor control. The choice of the optimal design type depends on several factors, including the level of amputation, the patient's physical activity, operating conditions, and economic constraints. However, despite significant advances in the field of biomedical engineering, improving the efficiency and durability of lower limb prosthetic feet remains an urgent task, which requires a thorough understanding of their elastic and strength characteristics.

Existing engineering solutions are mostly based on empirical approaches or limited testing of finished products, which does not allow for an accurate assessment of the influence of geometry and material parameters on the mechanical behavior of the prosthesis. As a result, this may lead to excessive weight and dimensions, reduced service life, and decreased user comfort.

In this regard, a relevant scientific and applied task is the study of the stress-strain state of lower limb prosthetic feet of various designs in order to determine their elastic and strength characteristics and establish the optimal structure. To achieve this goal, it is advisable to apply modern numerical analysis methods, particularly finite element modeling, which allows for a comprehensive evaluation of the stress-strain state of the prosthesis without the need for a large number of physical experiments.

The objective of the study is to develop and analyze finite element models of prosthetic feet with different configurations, to investigate their stress-strain states under operational loads, to compare the obtained results, and to formulate recommendations for optimizing the geometry of the prosthetic foot in order to improve its strength, reliability, and biomechanical efficiency.

The aim of the study is to investigate the influence of prosthetic foot geometry on their stress-strain state and biomechanical efficiency under operational loads.

Main materials. The study was conducted in a software environment based on the finite element method. To reduce the computational load on the computer, the models were limited in terms of the number of components, focusing only on the foot modules (Fig. 1). The development

of the computational schemes was carried out using a specialized software package for creating three-dimensional models.

a b

Fig. 1 – Human foot: a) natural, b) prosthetic foot module

The models differed in the shape of the prosthetic foot profile: Model 1 – anatomical shape, Model 2 – downward convex profile, Model 3 – control model with a flat profile.

The overall dimensions of all models – length, width, and height – were identical. The models were based on the average dimensions of an adult human foot.

Each model was studied in three positions, with orientation depending on the gait phase: contact, support, and push-off.

The material chosen for the models in this study was carbon fiber composite, a material based on carbon fibers and a polymer matrix, as it provides a combination of key operational characteristics – lightweight, strength, elasticity, durability, and energy efficiency.

During the calculations, the prosthetic foot was loaded with a force equivalent to the body weight of an adult human.

Conclusion. Based on the results of this work, it is planned to analyze the stress-strain state of prosthetic feet under operational loads; to evaluate the effectiveness of the proposed prosthetic foot designs depending on their shape, gait phase, and walking mode in terms of strength and stiffness; and to provide recommendations for optimizing the shape of the prosthetic foot according to the conditions of use.

REFERENCES

1. Cong B., Zhang H. Innovative 3D printing technologies and advanced materials revolutionizing orthopedic surgery: current applications and future directions. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2025. Vol. 13. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1542179

2. Sitenko O., Sitenko T. Biomechanical aspects of endo-exo-prosthetics of the lower limbs. orthopaedics traumatology and prosthetics. 2024. No. 2. P. 69–75. https://doi.org/10.15674/0030-59872024269-75

3. Kapandji A. I. The Physiology Of The Joints, 5Ed, Vol. 2: The Lower Limb. Elsevier, 2009.

4. Ahmed S. I., Kadhim F. M. Modeling and simulation of a multi-axis ankle foot prosthetic. International Review of Applied Sciences and Engineering. 2025. https://doi.org/10.1556/1848.2025.01036

5. Variable-stiffness prosthesis improves biomechanics of walking across speeds compared to a passive device / E. Rogers-Bradley et al. Scientific Reports. 2024. Vol. 14, no. 1. https://doi.org/10.1038/s41598-024-67230-3

UDC 543.5:57.08

ELECTROLYTIC MODEL OF CONDUCTIVITY OF THE CYTOPLASM OF A BIOLOGICAL CELL

Shigimaga Victor, DSci, Prof., e-mail: biovidoc@btu.kharkiv.ua
Sukhin Vitaly, Sen. Lect., e-mail: vv.suhin@btu.kharkiv.ua
State Biotechnological University

The cytoplasm of a biological cell is an ionic resistive conductor of the second kind. Therefore, all the behavioral characteristics of electrolytes in an electric field are also inherent to the cell cytoplasm, with the only caveat being that it is not simply a water-salt solution, but a gel-like medium. Therefore, when considering the movement of dissociated ions within it, their viscous friction must be taken into account.

Let's consider the movement of current carriers-ions-in viscous cytoplasm in connection with the action of a pulsed electric field (PEF) on the cell in the form of a rectangular pulse lasting tens of microseconds. The pulsed field is used to avoid electrolysis and polarization phenomena. Note that the relaxation times of ions and other charges, including water dipoles in the cytoplasm, are significantly shorter than not only the pulse duration but also its leading edge. Therefore, all further discussions of the electrical conductivity of the cytoplasm can be conducted assuming its behavior is similar to that of an electrolyte in a constant electric field.

The driving force acting on a charge in an external field [1]:

$$F = q\,E = z\,e\,E, \tag{1}$$

where e is the elementary charge, z is the valence, E is the field strength.

Under the action of the driving force, the charge accelerates, overcoming the viscous drag force of the cytoplasm. If the charge's motion is assumed to be uniform, then the sum of the acceleration and friction forces should be equal to the force exerted by the field. For low ion velocities (at low PEF strength) in a viscous medium, the friction force can be assumed to be proportional to the velocity. From this, we obtain the differential equation for force balance (one-dimensional case):

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + f\frac{dx}{dt} = z\,e\,E, \tag{2}$$

where m is the mass of the charge-carrying ion, and f is the friction coefficient.

From differential equation (2), we can determine the ion velocity as a function of time, and through it, the current and then the conductivity. We will seek the solution to equation (2) as the sum of the partial solutions of the homogeneous and non-homogeneous equations. We first solve the homogeneous equation, where the right-hand side of (2) is equal to zero:

The general solution can be written as follows:

$$x = A\exp(\alpha t), \tag{3}$$

where A and α are constants of integration.

Solution (3) is obtained by substituting the characteristic quadratic equation, the solution of which with subsequent transformations gives the first particular solution (2) for the ion velocity in the PEF:

$$\left.\frac{dx}{dt}\right|_1 = -A\frac{f}{m}\exp\left(-\frac{f}{m}t\right). \tag{4}$$

We will seek the second particular solution of equation (2) in the form:

$$\left.\frac{dx}{dt}\right|_2 = \frac{zeE}{f}. \tag{5}$$

The sum of the particular solutions (4) and (5) gives the general solution:

$$\frac{dx}{dt} = \left.\frac{dx}{dt}\right|_2 + \left.\frac{dx}{dt}\right|_1 = \frac{zeE}{f} - A\frac{f}{m}\exp\left(-\frac{f}{m}t\right). \quad (6)$$

From here we can determine the constant A if we denote the velocity v_0 of the ion's own thermal motion in the absence of a field (i.e., when t=0):

$$v_0 = \frac{zeE}{f} - A\frac{f}{m} \quad npu \quad t = 0 \quad (7)$$

it follows that:

$$A = \left(\frac{zeE}{f} - v_0\right)\cdot\frac{m}{f} \quad (8)$$

substituting the constant (8) into the general solution (6) gives:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{zeE}{f}\left(1 - \exp\left(-\frac{f}{m}t\right)\right) + v_0\exp\left(-\frac{f}{m}t\right). \quad (9)$$

Assuming that Stokes' law for the friction of a sphere in a viscous liquid [2] is also valid for the uniform motion of a hydrated ion in a viscous cytoplasm, we can write that:

$$f = 6\pi\eta r, \quad (10)$$

where η is the viscosity of the cytoplasm, r is the radius of the hydrated ion. Using (10), we determine the ratio:

$$\frac{f}{m} = \frac{3\cdot 6\pi\eta r}{4\pi r^3\rho} = \frac{4{,}5\eta}{\rho r^2}.$$

From formula (11) it follows that the ratio f/m is large, since the radius of the ion, even hydrated, is very small, of the order of 10^{-10} m [3]. Therefore, the value of the exponent $\exp\left(-(f/m)t\right)$ very quickly, during the duration of the short front of the acting voltage pulse of the IEP, which is of the order of 10^{-7} s, becomes so small that it can be neglected. Then the expression for the velocity (9) is significantly simplified:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{zeE}{f}. \quad (12)$$

Now we can determine the current strength resulting from the movement of ions carrying charges of the same sign in a unit volume, according to the equation [2,3]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i C_i}{t} = n S l ze\frac{v}{l}, \quad (13)$$

where: q_i is the charge carried by the ion; C_i is the concentration, $\tau = l/v$ is the time of ion motion in the ion field, equal in this case to the duration of the rectangular pulse; S is the cross-section of the ion conductor; l is the length of the ion path along the field line. Substituting expression (12) for the velocity into equation (13), we obtain the current as a function of the field strength:

$$I = \frac{n(ze)^2 S}{f}E. \quad (14)$$

Dividing the obtained expression (14) by the cross-section, we obtain the current density:

$$j = \frac{n(ze)^2}{f}E. \quad (15)$$

When ions with different electrical charges move in the IEP, the current density is expressed

by the formula:

$$j = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n^+} n_i \left(z^+ e\right)^2}{f^+} + \frac{\sum_{i=1}^{n^-} n_i \left(z^- e\right)^2}{f^-} \right) E \,, \tag{16}$$

where $\sum_{i=1}^{n^+} n_i \left(z^+ e\right)^2 = n^+ \left(z^+ e\right)^2$ and $\sum_{i=1}^{n^-} n_i \left(z^- e\right)^2 = n^- \left(z^- e\right)^2$, and the + and – indices next to the quantities denote the signs of the corresponding charges of the ions in the viscous cytoplasm.

Assuming the general electrical neutrality of the cytoplasm, we can write that the sum of charges of opposite signs is equal to zero:

$$n^+ z^+ + n^- z^- = 0 \,. \tag{17}$$

Substituting (17) into (16), we obtain an expression for the current density:

$$j = n^+ \left(z^+ e\right)^2 \left(\frac{1}{f^+} + \frac{n^-}{n^+ f^-} \right) E \,. \tag{18}$$

Considering that the current density according to the definition of Ohm's law is equal to $j = \sigma E$, we obtain an expression for the conductivity of the cytoplasm:

$$\sigma = n^+ \left(z^+ e\right)^2 \left(\frac{1}{f^+} + \frac{n^-}{n^+ f^-} \right). \tag{19}$$

From expressions (18) and (19) it follows that the current density in the cell cytoplasm is proportional to the IEF strength, and the conductivity is independent of it (at low ion concentrations and low strength), which is confirmed by numerous experiments [4–7].

Thus, the conductivity of the cytoplasm, as an ionic conductor of the second kind, obeys Ohm's law under the following conditions: constant temperature, the average number of ions n^+ and n^- per unit volume, and the valence of ions z^+ and z^- (i.e., no electrolysis); independence of the friction coefficients f^+ and f^- from the ion velocity and the applied PEF; and homogeneity of the field.

REFERENCES

1. Feynman R. F., Leighton R. B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley Publ. Comp., Inc. Vol.2, 1966. – 1400 p. https://www.feynmanlectures.caltech.edu

2. Daniels F., Alberty R. A. Physical chemistry. N. Y.: John Wiley & Sons Publ., 1975. – 687 p.

3. Guggenheim E., Prue J. Physicochemical Calculations. Textbook. – Second Ed. – Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1956. – 491 p.

4. Shigimaga V. O. Biotehnologichnij kompleks impulsnoyi konduktometriyi i elektromanipulyaciyi z klitinami tvarin: avtoref. disertaciya. d-r. tehn. n.: 05.11.17. Harkiv, 2014. 36 S.

5. Smolyaninova Y. I., Shigimaga V. A., Kolesnikova A. O., Popivnenko L. I., Todrin A. F. Electric Conductivity and Resistance of Mouse Oocyte Membranes to Effect of Pulsed Electric Field in Cryoprotectant Solutions // Probl Cryobiol Cryomed. – 2018. – V.28. – No 4. – p. 311-321. https://doi.org/10.15407/cryo28.04

6. Horiainova Yu. A. Konspekt lektsii z dystsypliny «Metody kontroliu v haluzi» [Tekst] / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Donetskyi natsionalnyi universytet ekonomiky i torhivli imeni Mykhaila Tuhana-Baranovskoho, kafedra tekhnolohii u restorannomu hospodarstvi, hotel′no-restorannoi spravy ta pidpryiemnytstva. – Kryvyi Rih: DonNUET, 2020. – 136 s.

7. Elektroprovidnist′ biolohichnykh tkanyn i ridyn [Elektronnyi resurs]. – 2015. – Rezhym dostupu: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2ed4117a-fd3a-485e-8692377619095620/content (31.10.2025).

УДК 004.932.2:004.93’1:61

МЕТОД АДАПТИВНОГО КЛАСТЕРУВАННЯ ТА NON-LOCAL MEANS ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ КОМП’ЮТЕРНОЇ ТА МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ

Варданян К. А., асп., e-mail: karen.vardanian@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Медичні візуалізаційні системи, зокрема комп’ютерна томографія (КТ) та магнітно-резонансна томографія (МРТ), є ключовими інструментами діагностики та планування лікування. Проте ці методи схильні до появи гаусового шуму під час отримання зображень, що призводить до зниження якості та ускладнює розпізнавання дрібних анатомічних структур. Тому ефективне видалення шуму є критично важливим для підвищення точності діагностики при збереженні найтонших деталей, таких як текстури тканин і контури органів.

Сучасні підходи, зокрема методи машинного навчання та глибинних нейронних мереж (U-Net, DnCNN, GAN), демонструють високу ефективність у видаленні шуму, однак потребують великих наборів навчальних даних, мають значну обчислювальну складність та не завжди забезпечують узагальнюваність результатів для різних типів апаратури чи клінічних сценаріїв [1]. Тому розробка універсальних методів фільтрації, які поєднують математичну стабільність, адаптивність і здатність зберігати структури тканин без втрати діагностично важливої інформації, є науково важливою і практично необхідною задачею.

Метою дослідження є створення ефективного методу очищення КТ та МРТ-зображень від шуму без використання глибинного навчання, який поєднує статистичний підхід, адаптивне кластерування та алгоритм non-local means (NLM) [2] для збереження структурної цілісності медичних зображень.

Основні матеріали дослідження. Запропонована методологія складається з кількох взаємопов’язаних етапів. Спершу здійснюється оцінка рівня шуму за допомогою закону Марченка–Пастура [3], що походить із теорії випадкових матриць. Цей закон дозволяє статистично визначити дисперсію шуму через аналіз власних значень матриць фрагментів зображення. Такий підхід забезпечує точне глобальне оцінювання рівня шуму.

Далі реалізовано адаптивне кластерування фрагментів зображення. Для цього використовується комбінована стратегія — початкове надкластерування методом k-means із подальшим злиттям схожих кластерів відповідно до порогу міжкластерної відстані. Це дає змогу враховувати локальні відмінності у текстурі й контурних особливостях органів, що підвищує точність очищення.

Для КТ-зображень очищення дозволяє зменшити дозу опромінення без втрати якості діагностики, а для МРТ — скоротити час сканування, що підвищує комфорт пацієнтів. Також метод може бути використаний у системах контролю якості зображень у лікарняних PACS-сховищах та в процесах автоматичного планування променевої терапії, де важливо точно визначати контури цільових об’єктів.

Запропонований алгоритм може бути інтегрований у програмне забезпечення для променевої діагностики та телемедицини. Для КТ-зображень очищення дозволяє зменшити дозу опромінення без втрати якості діагностики, а для МРТ — скоротити час сканування, що підвищує комфорт пацієнтів. Також метод може бути використаний у системах контролю якості зображень у лікарняних PACS-сховищах та в процесах автоматичного планування променевої терапії, де важливо точно визначати контури цільових об’єктів.

Усередині кожного кластера проводиться двоетапне очищення:

1. Жорстке порогування (Hard Thresholding) у просторі PCA-SVD, що передбачає усунення шумових компонентів на основі власних значень, визначених законом Марченка–Пастура. Цей етап дає низькорівневе наближення до реальної структури зображення, видаляючи лише шумові частини.

2. М’яке порогування (Soft Thresholding) через лінійний оцінювач мінімальної середньоквадратичної помилки (LMMSE) у просторі головних компонент, що усуває залишковий шум, не спотворюючи дрібних деталей.

Фінальний етап – уточнення зображення за допомогою алгоритму Non-Local Means (NLM). Він базується на зваженому усередненні інтенсивностей пікселів, де ваги визначаються не відстанню між точками, а подібністю локальних структур. Це дозволяє зберігати краї та текстури, водночас ефективно знижуючи рівень шуму.

Отримані результати експериментів на КТ- та МРТ-наборах показали, що розроблений метод перевершує класичні підходи – вейвлет-порогування, фільтр Вінера та медіанне згладжування. Метод демонструє високу структурну подібність (SSIM) і покращене співвідношення сигнал/шум (PSNR), зберігаючи контрастність і чіткість меж органів.

У подальших дослідженнях передбачається вдосконалення алгоритму шляхом динамічної адаптації параметрів кластерування до типу тканини та рівня шуму. Також планується розробка гібридної схеми, що поєднає переваги даного статистичного методу з сучасними моделями машинного навчання для покращення узагальнюваності. Іншим перспективним напрямом є створення прискореної GPU-реалізації, що дозволить виконувати очищення зображень у реальному часі, а також дослідження можливостей інтеграції з методами реконструкції томографічних даних безпосередньо під час сканування.

Висновок. Розроблений метод адаптивного кластерування та non-local means є ефективним підходом для очищення медичних зображень без залучення глибинних нейронних мереж. Поєднання статистичного аналізу, кластеризації та нефільтраційних методів забезпечує баланс між приглушенням шуму та збереженням анатомічних структур. Завдяки універсальності метод може бути використаний не лише у медицині, але й у системах обробки цифрових зображень загального призначення, де важлива точність і деталізація.Таким чином, представлений підхід не лише покращує якість медичних зображень, але й відкриває нові можливості для підвищення точності діагностики, зменшення променевого навантаження та оптимізації клінічних процесів у медицині майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sharma M., Dogra A., Goyal B., Gupta A., Saikia M. J. Detail-preserving denoising of CT and MRI images via adaptive clustering and non-local means algorithm // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 23859.

2. Buades A., Coll B., Morel J. A. A non-local algorithm for image denoising // IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 2. – P. 60–65.

3. Marchenko V. A., Pastur L. A. Distribution of eigenvalues for some sets of random matrices // Mathematics of the USSR Sbornik. – 1967. – Vol. 1. – P. 457–483.

УДК 616-072.1

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЕНДОСКОПІЇ

Власюк Д. А., асп., e-mail: dmytro.vlasiuk1@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Сучасна ендоскопія давно вийшла за межі простої візуальної діагностики. Вона активно розвивається як ключовий напрямок малоінвазивної хірургії. Це призвело до появи нових типів ендоскопічних втручань, які вимагають окремої класифікації. Зокрема, мова йде про розвиток просунутих терапевтичних технік, таких як ендоскопічна підслизова дисекція (ESD), а також про появу абсолютно нового типу процедур – ендоскопії з підтримкою штучного інтелекту (ШІ).

Систематизація цих нових типів втручань є вкрай актуальною, оскільки кожна техніка висуває унікальні вимоги до інструментарію, програмного забезпечення та методів обробки зображень [1].

Метою дослідження є огляд та класифікація сучасних типів ендоскопічних процедур, з акцентом на їх технологічних та інженерних відмінностях.

Основні матеріали досліджень. Класифікацію сучасних ендоскопічних методів доцільно проводити не лише за інструментом (гнучкий/ригідний), але й за типом технології, що застосовується.

1. Типи терапевтичних (хірургічних) резекцій. Це ключовий напрямок розвитку. Якщо традиційна поліпектомія була обмежена розміром петлі, то нові техніки дозволяють видаляти великі та пласкі новоутворення:

- Ендоскопічна резекція слизової (EMR): Тип втручання, що дозволяє видаляти утворення шляхом їх «всмоктування» або підняття ін’єкцією перед зрізанням.

- Ендоскопічна підслизова дисекція (ESD): Більш просунутий інженерний тип втручання. Він став справжнім проривом, оскільки дозволяє за допомогою спеціальних електрохірургічних ножів видаляти великі пухлини єдиним блоком, що раніше було можливо лише шляхом традиційної хірургії [2].

Окрім EMR та ESD, активно розвиваються так звані тунельні ендоскопічні втручання. Яскравим прикладом є пероральна ендоскопічна міотомія (POEM), що використовується для лікування ахалазії кардії та інших рухових розладів стравоходу. Інженерна складність цієї процедури полягає у створенні та роботі у вузькому підслизовому тунелі, що вимагає спеціалізованих інструментів для дисекції та гемостазу, а також високої точності навігації оператора виключно за візуальними орієнтирами.

2. Типи діагностики з підтримкою ШІ. Це новий клас процедур, де комп’ютерний зір допомагає оператору. Вони поділяються на два основні типи:

- Computer-Aided Detection (CADe): Системи, що в реальному часі аналізують відеопотік та підсвічують (наприклад, рамкою) підозрілі ділянки (поліпи), які лікар міг пропустити.

- Computer-Aided Diagnosis (CADx): Більш складні системи, що не просто знаходять, а й намагаються класифікувати знахідку (наприклад, визначити тип поліпа). Це створює окремі інженерні виклики. Для роботи таких систем у реальному часі потрібна миттєва обробка відеопотоку високої чіткості, що вимагає значних обчислювальних потужностей та оптимізованих алгоритмів.

3. Типи візуалізації (оптичні інновації). Хоча ШІ є цифровою інновацією, розвиваються й оптичні. Сюди належить віртуальна хромоскопія (наприклад, NBI), яка використовує спеціальні світлові фільтри для підсвічування капілярної сітки, що є окремим інженерним рішенням для покращення діагностики.

4. Роботизовані платформи та навігація. Ще одним вектором розвитку є інтеграція робототехніки для вирішення двох задач: стабілізації інструмента під час складних втручань (як ESD) та полегшення проходження ендоскопа. Сюди відносяться як платформи з

моторизованим дистальним кінцем, керовані джойстиком, так і системи магнітної навігації. Паралельно розвиваються системи комп'ютерної навігації, що використовують методи 3D-реконструкції для створення «карти» досліджуваного органу, допомагаючи лікарю в орієнтуванні [3].

Рисунок 1 – Цифровий медичний ендоскоп із можливістю підключення до комп’ютерних систем [4]

Висновок. Проведений аналіз чітко демонструє, що саме поняття «тип ендоскопії» суттєво трансформувалося. Якщо раніше класифікація будувалася переважно на інструменті (наприклад, ригідний чи гнучкий), то сьогодні вона визначається, в першу чергу, технологією, що лежить в основі процедури. Сучасна класифікація нерозривно пов'язана з конкретними інженерними рішеннями: від просунутих оптичних (як віртуальна хромоскопія **NBI**) до складних терапевтичних (як підслизова дисекція **ESD**) та програмно-апаратних (як системи **CADe/CADx**).

Можна стверджувати, що ендоскопія остаточно перетворилася на складну кіберфізичну систему. Її розвиток вимагає синергії багатьох галузей: біомедична інженерія відповідає за створення прецизійних терапевтичних інструментів та оптичних систем, тоді як комп'ютерні технології та робототехніка забезпечують навігацію та підтримку прийняття рішень. Окремим інженерним викликом у цьому контексті стає обробка даних. Системи CADx та 3D-навігації вимагають аналізу відеопотоку високої чіткості в реальному часі. Це стимулює розробку не лише ефективних програмних алгоритмів, але й спеціалізованих апаратних прискорювачів, здатних інтегруватися безпосередньо в ендоскопічну стійку. Очевидно, що подальший розвиток цієї галузі лежатиме саме у ще глибшій інтеграції цих, на перший погляд різних, інженерних напрямків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Martinez M., Bartel M. J., Chua T. et al. The 2023 top 10 list of endoscopy topics in medical publishing: an annual review by the American Society for Gastrointestinal Endoscopy Editorial Board. Gastrointestinal Endoscopy. 2024. Vol. 100(3). P. 537–548.

2. Ковель В. В. Оптимізація діагностики та малоінвазивного лікування хворих на ранній рак товстої кишки : дис. ... д-ра філософії. Київ: НУОЗУ ім. П. Л. Шупика, 2023. 215 с.

3. Сокольцов А. О., Аврунін О. Г. Інтелектуальні системи реального часу для 3D-реконструкції в ендоскопічній ринології: аналіз методів та архітектур. *Приладобудування: стан і перспективи* : матеріали XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 13–14 травня 2025 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 249–252.

4. Ресурсне забезпечення кафедри біомедичної інженерії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bme.nure.ua/resource-care-2/

УДК 615.47

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАНТОГРАФІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ДІАБЕТИЧНОЇ СТОПИ

Галушко Д. Є., асп., e-mail: dmytro.halushko@nure.ua
Федоров В. М., асп., e-mail: fvetalika2307@gmail.com
Голляк О. Д., студ., e-mail: oleksandr.holliak@nure.ua
Смирний Д. О., студ., e-mail: dmytro.smyrnyi@nure.ua
Носова Т. В., к.т.н., доц., e-mail: tatyana.nosova@nure.ua
Носова Я. В., к.т.н., доц., e-mail: yana.nosova@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Плантографія – це один із найпоширеніших методів дослідження анатомо-функціонального стану стоп людини, який дозволяє оцінити форму та особливості їхніх склепінь [1, 2]. Існують декілька видів пантографічної діагностики, зокрема оптична плантографія та термоплантографія, які можуть використовуватися окремо, або доповнювати діагностичні результати [3, 4]. За допомогою плантографічного дослідження можна визначити стан опорної поверхні стоп; оцінити рівномірність розподілу навантаження на ноги; перевірити ресорні (амортизаційні) властивості стоп як здатність склепінь пом'якшувати удари під час ходьби; виявити ступінь сплощення поздовжнього та поперечного склепінь, персоніфіковано підібрати устілки і проводити контроль ефективності ортопедичного лікування чи використання ортезів [1, 5].

Одним із показань проведення пантографічної діагностики є стан діабетичної стопи.

Мета дослідження – оцінити можливості використання методу плантографії для визначення стану діабетичної стопи.

Основні матеріали досліджень. При цьому захворюванні уражаються не лише шкірні покриви, а й судини, нервові закінчення, а також м'язова та кісткова тканина. Розрізняють дві основні форми діабетичної стопи, такі як ішемічна, яка пов'язана з ураженням судин, здебільшого спричиненим атеросклерозом артерій нижніх кінцівок і нейропатична форма, яка призводить к порушенням у місцях найбільшого тиску на стопу. При ішемічній формі хворий відчуває біль не тільки під час ходьби, а й у стані спокою. Стопи та гомілки набувають синюшного відтінку й залишаються холодними на дотик. Без своєчасного лікування існує високий ризик розвитку некротичних уражень. При нейропатичній формі порушення можуть проявлятися у таких видах, як нейропатична виразка, суглоб Шарко (остеоартропатія), нейропатичний набряк. Спочатку з'являється потовщення шкіри, згодом відбувається деформація стопи та утворюються виразки. Людина може відчувати легке печіння, однак із часом чутливість ноги помітно знижується. Це небезпечно тим, що пацієнт не помічає травм, опіків, забоїв чи потертостей, які часто виникають через незручне взуття. Потрапляння інфекції в такі рани значно ускладнює стан і може вимагати хірургічного втручання. Іноді спостерігається змішана форма діабетичної стопи – нейроішемічна, коли поєднуються патологічні ознаки обох типів.

Враховуючи особливості ішемічної форми діабетичної стопи, які будуть проявлятись порушеннями термічного поля, доцільно використовувати для визначення цього стану термоплантограф. Завдяки термочутливій плівці при зіткненні зі стопою на поверхні плантографа залишається кольоровий слід, що відображає стан склепіння стопи пацієнта. При ішемічному типу порушення на діагностичних зображеннях будуть спостерігатися викривлення термічного поля та ділянки зі зниженою температурою. Дослідження необхідно проводити в приміщеннях зі звичайною кімнатною температурою (в жарких кліматичних умовах діагностика ускладнена за рахунок малої різниці, або навіть інверсії температури навколишнього середовища та стопи людини). При нейропатичній формі доцільно використовувати звичайну оптичну плантограію, яка надасть детальний відбиток рельєфу стоп з проблемними ділянками і виражені деформації. Автоматизована обробка отриманих цифрових пантографічних зображень дозволить розраховувати основні діагностичні показники відразу у чисельній формі [6, 7]. Такі підходи можливо застосовувати також при

телемедичній діагностиці [8, 9]. Також у перспективі доцільно розглядати дослідження мікроциркуляції в комплексному підході для діагностики діабетичної стопи [10].

Висновок. Плантографічна діагностика дозволяє отримати інформацію, що стосується навантаження окремих частин стопи, виявити неправильність положення стопи і призначити своєчасну профілактику, щоб уникнути подальшого прогресування захворювання. В залежності від типу патологічного тану діабетичної стопи доцільно рекомендувати два різних типа плантографії, або використовувати їх комплексно. Для діагностики та динамічного спостереження за процесом лікування при ішемічній формі діабетичної стопи доцільно використовувати термоплантографічні дані. При нейропатичній формі більш інформативним методом є звичайна плантографія. Також доцільно зробити метод комбінованої термоплантографічної діагностики з накладанням зображень з обох діагностичних модальностей для виявлення чіткої локалізації та об'єму різних типів ушкоджень стоп.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С. В. Павлов, О.Г. Аврунін, С.М. Злепко, Є.В. Бодянський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. 260 с.

2. Цапенко В. В., Терещенко М. Ф. Метод дослідження біомеханічних параметрів стопи людини. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. № 29. С. 51–59.

3. Галушко Д. Є. Методи попередньої обробки зображень при плантограічній діагностиці / Д. Є. Галушко, Т. В. Носова, Я. В. Носова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей XXXIII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 1546.

4. Аспекти автоматизованої обробки зображень під час плантографічної діагностики / Д. Є. Галушко, Т. В. Носова, Н. Д. Євстратов, Я. В. Носова, С. А. Семашко // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р. – Харків : Держ. біотехнологічний ун-т., 2024. – С. 188-189.

5. Галушко Д. Є. Аспекти попередньої обробки плантографічних зображень / Д. Є. Галушко // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : наукові пошуки молоді : матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., 3 квітня 2025 р. – Харків : Держ. біотехнологічний ун-т., 2025. – С. 133.

6. Місоченко С. Ю., Селіванова К. Г., Аврунін О. Г. Дослідження використання вірогіднісних методів у сфері обробки біомедичних зображень. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науковопрактичної конференції MicroCAD2022, 19-21 жовтня 2022 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. С. 902.

7. Tymkovych, M. et al. (2021). Application of SOFA Framework for Physics-Based Simulation of Deformable Human Anatomy of Nasal Cavity. 8th European Medical and Biological Engineering Conference. EMBEC 2020. IFMBE Proceedings, vol 80. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64610-3_14.

8. Avrunin, O., Kolisnyk, K., Nosova, Y., Tomashevskyi, R., & Shushliapina, N. (2020). Improving the methods for visualization of middle ear pathologies based on telemedicine services in remote treatment. Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 347-350. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250090.

9. Sokol, Y., Avrunin, O., Kolisnyk, K., & Zamiatin, P. (2020). Using medical imaging in disaster medicine. Paper presented at the 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2020 - Proceedings, 287-290. doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263175.

10. Ковальова А. А. Можливості оцінки мікроциркуляції за допомогою капіляроскопії / А. А. Ковальова, О. Г. Аврунін // Матеріали 1 Міжнародної науково-технічної конференції Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем СПІРН-2019.– Вінниця, ВНТУ, 2019. – С. 49-50.

УДК 615.47:621.9(043.3)

ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ В ПЕРСОНАЛІЗОВАНІЙ РОЗРОБЦІ ПРОТЕЗІВ ТА ОРТЕЗІВ ДЛЯ ПАЦІЄНТІВ З ОБМЕЖЕНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

Горбовий О. В., асист., e-mail: oleg.gorbovuy@gmail.com
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні ефективних протезно-ортезних рішень для пацієнтів з обмеженими можливостями, що відповідають сучасним вимогам до якості життя, соціальної інтеграції та реабілітаційного супроводу. Традиційні методи виготовлення виробів часто ігнорують індивідуальні анатомічні та біомеханічні особливості, що знижує їхню ефективність. 3D-друк дає змогу інтегрувати цифрове моделювання, адитивне виробництво та біосумісні матеріали в єдиний технологічний цикл, що відкриває можливості для принципово нового рівня персоналізації.

Мета дослідження – комплексне наукове обґрунтування ролі технологій 3D-друку в персоналізованому проєктуванні та виготовленні протезів та ортезів для пацієнтів з обмеженими можливостями, а також у визначенні перспектив їхньої інтеграції в сучасну клінічну та реабілітаційну практику.

Основні матеріали досліджень. Проблема забезпечення пацієнтів з обмеженими можливостями ефективними протезами та ортезами набуває особливої актуальності в умовах зростання вимог до якості життя та соціальної інтеграції. Традиційні методи виготовлення таких виробів часто ігнорують індивідуальні анатомічні особливості, що спричиняє дискомфорт, обмежує функціональність та зменшує бажання пацієнтів ними користуватися. У цьому контексті 3D-друк є інноваційним інструментом, здатним забезпечити персоналізований підхід до створення протезно-ортезних систем. Завдяки цифровому моделюванню та адитивним технологіям з’являється можливість виготовляти вироби з високою точністю, використовуючи біосумісні матеріали та оптимізовані конструктивні рішення, що відповідають сучасним науковим уявленням про ергономіку та біомеханіку.

Дослідження, присвячені застосуванню 3D-друку в персоналізованій розробці протезів і ортезів для пацієнтів з обмеженими можливостями, згруповано за чотирма основними напрямами. Перший напрям формує біомеханічно орієнтовані засади індивідуального дизайну. М. І. Литвиненко, Л. М. Рисована, В. В. Григорук та співавтори доводять, що урахування кінематичних і силових характеристик опорно-рухового апарату допомагає оптимізувати параметри жорсткості виробу, рівномірний розподіл контактних тисків та запобігти вторинним ускладненням, що відкриває можливості для використання параметричних CAD-шаблонів у 3D-друці.

Другий напрям охоплює матеріалознавчо-технологічні рішення. С. Веннам (S. Vennam), К. Н. Віджаясанкар (K. N. Vijayasankar), Ф. Паті (F. Pati) порівнюють матеріали й техніки друку, підкреслюючи вплив параметрів виготовлення на біосумісність та жорсткість пристроїв [4]. Х. К. Банґа (H. K. Banga), П. Калра (P. Kalra), Р. М. Белокар (R. M. Belokar), Р. Кумар (R. Kumar) демонструють відтворюваність маршруту «сканування → моделювання → друк» для протезно-ортезних виробів та окреслюють потребу в контролі якості.

Третій напрям стосується платформ та промислового впровадження. Ф. Ґурський (F. Górski), Є. Денисенко (Y. Denysenko), В. Кучко (W. Kuczko) та співавтори презентують AutoMedPrint як конвеєр для персоналізованих виробів – від збору анатомічних даних до створення бібліотек готових рішень. Р. Міклауш (R. Miclaus), А. Репановичі (A. Repanovici), Н. Роман (N. Roman) окреслюють потенціал PLA у виготовленні протезів та ортезів, акцентуючи на компромісі між технологічною зручністю та обмеженнями міцності. П. П. Бортакур (P. P. Borthakur) акцентує на перспективах алгоритмічного дизайну, гібридних технологій та інтеграції сенсорики для створення «розумних» протезів. А. Демеко

(A. Demeco), Р. Форесті (R. Foresti), А. Фріццієро (A. Frizziero) та співавтори підтверджують, що 3D-друковані ортези верхніх кінцівок сприяють реабілітації після інсульту, даючи змогу швидко адаптувати конструкцію. Для подальшого розвитку напряму необхідно формалізувати протоколи валідації виробів, розширити бібліотеки параметричних моделей та розробити сенсори для моніторингу навантажень під час експлуатації.

Четвертий напрям охоплює проєктуванням, орієнтоване на користувача, та аналіз клінічної ефективності. Ґ. Туманн (G. Thomann) та В. А. де Карвальо (V. A. de Carvalho) на прикладі дитини з геміплегією довели, що для персоналізації виробів необхідно поєднувати клінічні вимірювання зі швидким прототипуванням. Р. Торсен (R. Thorsen), Ф. Борто (F. Bortot) та А. Караччоло (A. Caracciolo) описують модель ко-дизайну з пацієнтом, яка підвищує функціональність і прийнятність виробів. Т. А. М. Оуд (T. A. M. Oud), Е. Лаццарі (E. Lazzari), Г. Й. Х. Дж. Гейсберс (H. J. H. Gijsbers) та співавтори в скопінґ-огляді доводять ефективність 3D-друкованих ортезів у разі травматичних і хронічних патологіях кисті, проте вказують на потребу в стандартизованих протоколах оцінки та довготривалих спостереженнях. Отже, необхідно здійснювати мультицентрові клінічні дослідження з уніфікованими кінцевими точками, оцінкою економічної ефективності та розвитком ко-дизайну для різних груп пацієнтів.

Попри значні успіхи в упровадженні адитивних технологій у протезуванні та ортезуванні, залишається низка нерозв’язаних проблем. Зокрема, недостатньо досліджень щодо інтеграції 3D-друку з урахуванням індивідуальних анатомічних особливостей пацієнтів, що знижує точність та ергономіку виробів. Обмеженим є розуміння впливу технологій на функціональність і комфорт користувачів, а також відсутні системні оцінки економічних та організаційних ефектів. Крім того, додаються технологічні й матеріалознавчі обмеження та відсутність єдиних нормативно-правових стандартів, що істотно гальмує клінічне застосування.

Висновок. Висновки підтверджують, що 3D-друк спроможний забезпечити високий рівень персоналізації виробів, підвищити якість реабілітації та розширити доступність сучасних медичних технологій. З’ясовано, що його впровадження потребує стандартизації цифрових протоколів, розвитку матеріалознавчої бази, автоматизації виробництва та створення мультидисциплінарних клініко-інженерних команд.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tkach, Oleg, Viktor Dubik, Oleh Ovcharuk, Lyudmila Mikhaylova, Hanna Pantsyreva, Dariia Vilchynska, Sergii Slobodian, and Oleg Gorbovy. "Technological characteristics and potential of biogas from a municipal solid waste (MSW) landfill for electricity generation." *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)* 13, no. 2 (2023): 97-108.

2. Tryhuba, A., Bashynsky, O., Garasymchuk, I., Gorbovy, O., Vilchinska, D., Dubik, V. Research of the variable natural potential of the wind and energy energy in the northern strip of the ukrainian carpathians.(2020) E3S Web of Conferences, 154, art. no. 06002.

3. Горбовий О. В. Дослідження процесу залучення комах до штучних джерел оптичного випромінення / Горбовий О.В., Михайлова Л..М., Дубік В..М. // Розвиток освіти, науки та бізнесу: результати 2020: тези доп. міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 3-4 грудня 2020 р. – Україна, Дніпро, 2020. – Т. 1. – С.307–310.

4. Горбовий О. В. Двоканальний неінвазивний транскраніальний стимулятор. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р., Держ. біотехнологічний ун-т. Харків: ДБТУ, 2024. С. 190-191.

УДК 537.8:631.52

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ З САДОВИМИ КУЛЬТУРАМИ

Денисов Д. Ю., асп., e-mail: tigrossimo@gmail.com
Чорна М. О., к.т.н., доц., e-mail: masher1533@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В сучасному сільському господарстві зростає інтерес до застосування фізичних методів впливу на біологічні об’єкти з метою підвищення врожайності, покращення якості продукції та зменшення використання хімічних добрив. Одним із перспективних напрямів є використання електромагнітних полів (ЕМП), які здатні стимулювати фізіолого-біохімічні процеси в рослинах.

Результати численних досліджень свідчать, що під впливом ЕМП змінюються швидкість проростання насіння, інтенсивність фотосинтезу, водообмін і стійкість рослин до стресових факторів. Однак для садових культур механізми дії електромагнітного поля залишаються недостатньо вивченими, а ефективні режими опромінення — не визначеними.

Враховуючи актуальні проблеми екологізації аграрного виробництва, пошуку енергоощадних технологій та підвищення ефективності вирощування плодових і ягідних культур, дослідження процесу взаємодії електромагнітного поля з садовими культурами є науково обґрунтованим і практично значущим завданням. Отримані результати можуть стати основою для розробки нових біофізичних технологій стимулювання росту та розвитку рослин без використання хімічних засобів.

Мета дослідження – установити закономірності впливу електромагнітного поля певних параметрів на фізіолого-біохімічні процеси в садових культурах з метою підвищення їхньої продуктивності, стійкості до несприятливих умов та покращення якості урожаю.

Основні матеріали досліджень. Для ефективного застосування електромагнітного поля (ЕМП) у технологіях стимуляції росту та розвитку садових культур необхідно визначити біотропні параметри, які забезпечують позитивний біологічний ефект без пошкодження тканин рослин. До таких параметрів належать частота, інтенсивність електричного поля, індекс модуляції та тривалість опромінення.

Відомо, що вплив ЕМП на біологічні об’єкти має резонансний характер — при певних частотах відбувається узгодження коливань зовнішнього поля з власними біоелектричними процесами в клітинах рослин. Саме в цих умовах спостерігається максимальна активація фізіолого-біохімічних реакцій, що сприяє інтенсифікації росту, фотосинтезу та покращенню обміну речовин.

На основі аналізу попередніх досліджень установлено, що оптимальний діапазон частот для стимулюючої дії на рослинні тканини лежить у межах 30–40 ГГц, що відповідає міліметровому (КВЧ) діапазону електромагнітних хвиль. У цьому інтервалі:

- діелектрична проникність клітинних структур рослин змінюється незначно, що забезпечує рівномірний розподіл енергії в об’ємі клітини;
- довжина хвилі є співрозмірною з геометричними розмірами клітинних елементів, що сприяє виникненню резонансних коливань;
- спостерігається мінімальний нагрів тканин, тому процес впливу має нелінійно-інформаційний характер.

Для досягнення біостимулюючого ефекту інтенсивність електричного поля доцільно підтримувати в межах 10–15 В/м, а тривалість опромінення — 200–400 с, залежно від виду культури та стадії її розвитку. Частота модуляції, як правило, вибирається в діапазоні 50–150 Гц, що відповідає біоритмам клітинних процесів.

Отже, встановлений діапазон біотропних параметрів ЕМП забезпечує інформаційно-резонансну взаємодію з біологічними структурами садових культур, що призводить до активації ростових процесів, підвищення фотосинтетичної активності та, як наслідок,

зростання врожайності і покращення якості плодів [1].

Для кількісного опису процесу взаємодії електромагнітного поля (ЕМП) з біологічними структурами рослин необхідно враховувати як фізичні властивості середовища, так і геометричні параметри клітинних елементів. Садові культури можна розглядати як біодіелектричні об'єкти, у яких під дією змінного електромагнітного поля виникають поляризаційні та індукційні процеси.

Електромагнітне поле в середовищі описується системою рівнянь Максвелла:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля, H – магнітне поле, $D = \varepsilon E$ – електрична індукція, $B = \mu H$ – магнітна індукція, J – густина струму провідності, ρ – об'ємна густина заряду.

Для рослинної тканини, що має властивості слабкого провідника, густину струму можна записати як:

$$J = \sigma E, \quad (2)$$

де σ – ефективна електропровідність клітинної структури.

Клітину можна змоделювати як сферичний або еліпсоїдний діелектричний об'єкт, занурений у середовище з іншими електрофізичними властивостями. Ефективна напруженість електричного поля всередині клітини визначається за виразом:

$$E_{\text{вн}} = E_0 \cdot \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2}, \quad (3)$$

де E_0 – напруженість зовнішнього поля, ε_1 – діелектрична проникність клітини, ε_2 – діелектрична проникність міжклітинного середовища.

Інтенсивність електромагнітного впливу в середовищі характеризується щільністю поглиненої потужності:

$$P = \frac{1}{2}\sigma |E_{\text{вн}}|^2. \quad (4)$$

Ефективність стимуляції визначається біотропною функцією $F(f, E, t)$ яка залежить від частоти f, напруженості поля E та тривалості опромінення t:

$$F(f, E, t) = k \cdot E^2 \cdot \exp\left[-\alpha(f - f_0)^2\right] \cdot \left(1 - e^{-\beta t}\right), \quad (5)$$

де f_0 – резонансна частота, α, β, k – експериментальні коефіцієнти, що визначають форму відгуку.

Максимум функції F відповідає оптимальним умовам опромінення, за яких спостерігається максимальний біостимулюючий ефект.

Висновок. Розроблена математична модель показує, що резонансна взаємодія ЕМП із клітинними структурами виникає за умови узгодження зовнішньої частоти з внутрішніми біоелектричними коливаннями. При цьому в клітині посилюється обмін іонів, активується транспорт речовин через мембрани та підвищується метаболічна активність, що в підсумку сприяє прискоренню ростових процесів і збільшенню врожайності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Analysis of the electromagnetic field of multilayered biological objects for their irradiation in a waveguide system / V. Popriadukhin, I. Popova, N. Kosulina, A. Cherenkov, M. Chorna // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №6/5(90). – P. 58 – 66.

УДК 621.373

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНДУКТИВНОСТІ НА НАВАНТАЖУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ СОНАТРОДА

Дубік В. М., к.т.н., доц., e-mail: vmdubick@gmail.com
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

Актуальність дослідження. Ефективність роботи ультразвукового медичного апарату (УЗМА) критично залежить від стабільності амплітуди коливань робочої зони хвилеводу-інструменту (сонатрода). Ця стабільність порушується через зміни умов взаємодії інструменту з технологічним середовищем, які, в свою чергу, відображаються на еквівалентному навантаженні ультразвукового п'єзокерамічного випромінювача. Очевидно, що для кожного випромінювача існує граничне значення допустимого навантаження, яке визначається низкою конструктивних і технологічних факторів. У наукових роботах використовується поняття навантажувальної здатності акустичного випромінювача або хвилеводу-інструменту. Ці можливості іноді виявляються вкрай обмеженими.

Метою дослідження є досягнення максимальної для даної конструкції здатності навантаження випромінювача, оскільки цей параметр дозволяє істотно розширити технологічні можливості використовуваного ультразвукового обладнання.

Основні матеріали досліджень. Оскільки в більшості випадків практичного застосування ультразвукові п'єзокерамічні перетворювачі використовуються на частотах, близьких до резонансної, точне визначення резонансної частоти сонатроду необхідне для забезпечення узгодження з ультразвуковим генератором. Неузгодженість призводить до зниження ефективності, перегріву та передчасного виходу обладнання з ладу. Вимір електричного імпедансу для узгодження системи перетворювач-сонатрод в залежності від частоти знаходимо резонансну частоту. На резонансній частоті імпеданс досягає мінімального значення (резонанс струму) як показано на рис.1.

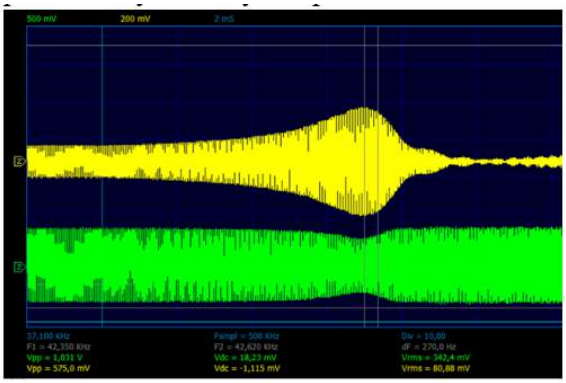


Рис.1. Визначення резонансної частоти сонатроду ($f_p = 42.350$ кГц)

При аналізі УЗМА, вкрай важливою є правильна оцінка властивостей та характеристик електроакустичного тракту, знання характеру впливу як окремих параметрів випромінювача, так зміни імпедансу навантаження на вхідні частотні, фазові та навантажувальні характеристики тракту в цілому [1]. Спрощена еквівалентна схема акустичного випромінювача виглядатиме так, як показано на рис. 2.

Для схеми, зображеної на рис. 2, скористаємося комплексним методом розрахунку режимів, що встановилися в лінійному електричному колі визначаємо комплексну провідність схеми, що складається з двох послідовно-паралельно з'єднаних ділянок:

$$Y_2 = Y_1 + 1/Z_2, \qquad (1.1)$$

де $Y_1 = j\omega C_k$.

C_k – власна ємність керамічного матеріалу.

Для визначення Z_2 об'єднуємо послідовно включені резистори в одну $R_m = R_n + R_a$, де R_m – загальний опір,

R_n – величина опору втрат,

R_a – опір акустичного навантаження.

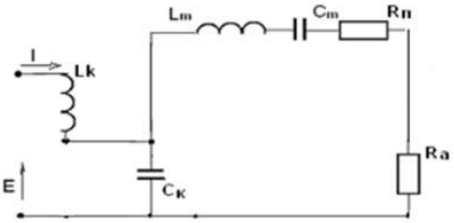


Рис. 2. Розрахункова схема математичної моделі електроакустичного тракту УЗМА з п'єзовипромінювачем поздовжнього типу з додатковою індуктивністю.

$$Z_2 = R_m + j(\omega L_m - 1/\omega C_m),$$

де L_m – еквівалентна індуктивність, що відповідає масі випромінювача,

C_m – еквівалентна ємність, що відповідає пружності випромінювача.

Визначення усереднених параметрів еквівалентної схеми випливають з наступних виразів:

$$Q = \rho / r;\ \rho = \sqrt{L_m} / C_m;\ \omega = 1/\sqrt{L_m C_m}. \qquad (1.2)$$

Знаючи добротність акустичної системи (а на холостому ходу, за даними [1, 2], вона становить від 400 до 800), прийняті значення відносної резонансної частоти ($\omega / \omega_0 = 1$) і відносного опору втрат на холостому ході ($r = 1$), визначимо середні значення параметрів L_m і C_m. Тоді для прийнятої середньої добротності акустичної системи 500 одиниць, параметри L_m і C_m дорівнюють відповідно 500 і 0,002. Як зміна параметри будуть виступати ті, вплив яких на характеристики акустичної системи і буде нас цікавити. Амплітудні характеристики ультразвукового п'єзокерамічного зображено на рис. 3.

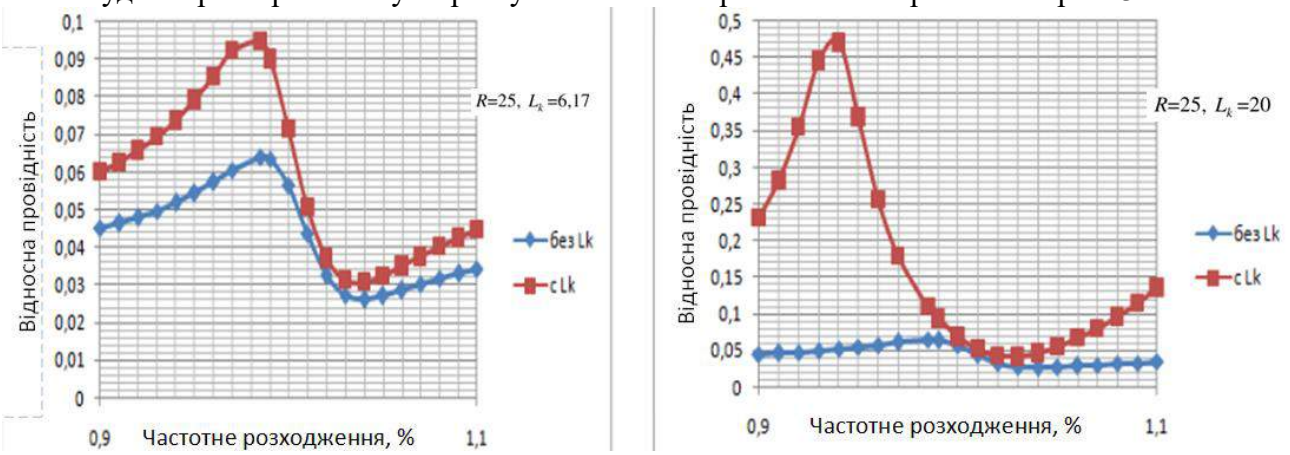


Рис. 3. Амплітудні характеристики ультразвукового п'єзокерамічного випромінювача поздовжнього типу при різних параметрах додаткової індуктивності L_k і різних значеннях навантаження

Висновки. З аналізу графіків для зменшення впливу навантаження на основні характеристики ультразвукового п'єзоелектричного випромінювача поздовжнього типу необхідно збільшувати його хвильовий опір ρ. Збільшення хвильового опору випромінювача можливе двома шляхами:

- зниженням пружної складової C_m, що є небажаним моментом, оскільки за інших рівних умов зниження C_m пов'язане зі збільшенням площі поперечного перерізу випромінювача, що призведе лише до збільшення вагогабаритних показників випромінювача;

- Збільшенням масової складової L_m. При цьому очевидно зростання здатності навантаження випромінювача за рахунок зниження впливу R_m на зміну ω_0 зі збільшенням маси випромінювача зростає і його здатність навантаження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hadjiloizi, D., Hadjipanteli, A., & Chrysostomou, C. (2022). Mathematical Modelling of Cylindrical Piezoelectric Transducers for Electroacoustic Devices. Radioelectronic and Computer Systems, (1), 51-58.

2. Gao, F., Zhang, K., Tang, M., et al. (2022). Recent Development and Perspectives of Optimization Design Methods for Piezoelectric Ultrasonic Transducers. Sensors, 12(7), 779.

УДК 615.831: 615.47.125

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОГЛИНАННЯ ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛАЗЕРА ШКІРОЮ ВИМЕНІ КОРОВИ

Дьоміна Т. О., асп., e-mail: t.dyomina241@gmail.com
Лисиченко М. Л., д.т.н., проф., e-mail: 1prlysychenko@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Сучасне молочне скотарство стикається з низкою системних викликів: зростання резистентності збудників маститу [1] й тиск на скорочення використання антибіотиків [2]; вимоги до добробуту тварин, стабільності надоїв і якості молока; дефіцит кваліфікованого персоналу на тлі автоматизації ферм [3, 4].

Існуюча престимуляція молоковіддачі (миття, тепле витирання, короткий масаж/strip) залишається золотим стандартом, але має уразливості: залежність від людського фактора й рутинної дисципліни, варіабельність інтенсивності/тривалості, чутливість до стресорів середовища; як наслідок – затримка молоковиведення, зменшення швидкості потоку й більша частка повторних під'єднань. При цьому, лазерне опромінювання біологічно активних точок (БАТ) вимені корови у режимі фотобіомодуляції може використовуватися як релевантний ад'ювант, що покращує мікроциркуляцію та сенсорний фон вимені без термічного чи фармакологічного навантаження та інтегрується в початкову фазу процесу доїння: опромінення здійснюють упродовж перших 2 *хв* після під'єднання доїльного апарату без зміни стандартної послідовності дій.

Мета дослідження – розробка адаптованої математичної моделі поглинання випромінювання лазера ділянки шкіри вимені корови, де розміщуються БАТ №62 «*jan-min*» з урахуванням наявності покривного волосся шкіри та комбінованої різновидності його структури.

Основні матеріали досліджень. Біофізичне підґрунтя застосування лазерного випромінювання на БАТ вимені полягає у вибірковому поглинанні випромінювання лазера (λ≈660–680 *нм*). Безпосередньо на початку престимуляції можна за допомогою активізації хромофорами шкіри (передусім цитохром-с оксидазою), що ініціює каскади NO-залежної азодилатації, помірного підвищення мікроциркуляції, нормалізації сенсорного порогу С-волокон і зменшення локального запалення. На рівні рефлекторної дуги це може підсилити аферентний сигнал від БАТ та сприяти вивільненню окситоцину з нейрогіпофізу, який забезпечує скорочення міоепітеліальних клітин альвеол і потрапляння молока з альвеол до «цистерни» вимені, тобто власне молоковіддачу.

Математичний опис поведінки світла лазера при опроміненні шкіри повинен містити дифузійне згасання фотонів та їх локальне поглинання. У першому наближенні флуенс згасає експоненційно, а об'ємна швидкість поглинання прямо пропорційна флуенсу:

$$\mu_{eff} = \sqrt{3\,\mu_a(\mu_a + \mu_s')}\,;\ \Phi(z) = \Phi_0 e^{-\mu_{eff} z};\ Q_{abs(z)} = \mu_a \Phi(z) \qquad (1)$$

де μ_a — коефіцієнт поглинання; $\mu_s' = \mu_s\,(1-g)$ – редуковане розсіювання (індекс s у μ_s означає *scattering* – розсіювання); g – анізотропія; μ_{eff} – ефективний коефіцієнт згасання; $\Phi(z)$ – флуенс на глибині z; Φ_0 – флуенс біля поверхні; $Q_{abs(z)}$ – потужність, що поглинається одиницею об'єму.

Для покрівельного волосся розглянемо поперечне та поздовжнє (світловодне) поглинання волосиною. Поглинання поперечного опромінення стрижнем волосини $I_\tau(x)$ описується законом Бугера–Ламберта–Бера; для поздовжнього перенесення хвилі світла зручно виділити ефективне лінійне затухання:

$$I_\tau(x) = I_0\, e^{-\mu_{a,h} x}\,,\ I_\gamma(z) = I_{cap} e^{-\alpha_{eff} z} \qquad (2)$$

де $I_\tau(x)$ – інтенсивність при проходженні впоперек стрижня на шляху x; I_0 – падаюча

інтенсивність; $\mu_{a,h}$ – коефіцієнт поглинання волосини; $I_\gamma(z)$ – інтенсивність, що прямує уздовж осі волосини на відстані z; I_{cap} – частка, «захоплена» в напрямлені моди; α_{eff} – ефективне поздовжнє затухання, що викликано поглинанням та витоками на кутикулі та інших нерівностях.

Параметр $\mu_{a,h}$ можна розкласти через внески хромофорів волосини (меланін, кератин):

$$\mu_{a,h}(\lambda) \approx \sum_k f_k \mu_{a,k}(\lambda), \text{ зокрема: } \mu_{a,mel}(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda}\kappa_{mel}(\lambda), \quad (3)$$

де $\mu_{a,h}$ – коефіцієнт поглинання волосини; $\mu_{a,mel}(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання меланіна у волоссі та шкірі; f_k – об'ємна частка k-го хромофора; κ_{mel} – уявна частина показника заломлення меланіну; λ – довжина хвилі.

Комбінована математична модель описує стикання лазерного променя зі шкірою, що покрита волоссям, має вхідні втрати променя та внесок тієї його частки до світловоду, який практично утворює волосина на вимені. Чиста частка енергії, що дістається шкіри, обмежена поверхневими втратами, до неї додається «захоплене» світло із волосини:

$$H_{skin}(z) \approx H_0(1-C)(1-\bar{R})e^{-\mu_{eff}z} + \eta_h H_0 C T_{cape} e^{-\alpha_{eff} z_h}, \quad (4)$$

де $H_{skin}(z)$ – поверхнева енергія (флюенс), що досягає шкіри й згасає з глибиною z; H_0 – падаючий флюенс; C – частка площі, екранована волоссям; $\bar{R}$ – усереднене відбиття; μ_{eff} – ефективний коефіцієнт згасання; η_h – частка витоку енергії з волосини в шкіру; T_{cape} – ефективна частка потоку, що прямує волосиною; z_h – характерний шлях уздовж волосини до місця витоку; α_{eff} – поздовжнє затухання в волосині.

Таким чином, формули (1–4) дозволяють параметрично оцінити, умови проходження енергії квантів когерентного випромінювання від напівпровідникового лазера безпосередньо до клітин шкіри у місті розміщення БАТ.

Висновок. Ефективність опромінення вимені з метою стимулювання рефлексу молоковиведення визначається як втратами вхідного потоку на розсіювання і «екранування» покривним волоссям вимені, так і його оптичною провідністю. Частина випромінювання (≈660-680 *нм*), що під косим кутом входить у покрив вимені, тобто падає у напрямку моди контакту лазера, може транспортуватись далі вздовж волосини та потрапляти у шкіру в точках контакту, впливаючи на нижчі шари БАТ, де розташована густа мережа нервових закінчень і кров'яних судин, що активує механорецептори та С-волокна і далі посилює аферентний сигнал до гіпоталамуса**.**

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Antimicrobial consumption and resistance in bacteria from humans and food-producing animals: Fourth joint inter-agency report on integrated analysis of antimicrobial agent consumption and occurrence of antimicrobial resistance in bacteria from humans and food-producing animals in the EU/EEA ACRA IV – 2019–2021) // *EFSA Journal*. 2024. 22(2): e8589. DOI: 10.2903/j.efsa.2024.8589. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38405113/

2. Acosta, A.; Tirkaso, W.; Nicolli, F.; Van Boeckel, T. P.; Cinardi, G.; Song, J. The future of antibiotic use in livestock // *Nature Communications*. 2025. 16: 2469 (Article number). DOI: 10.1038/s41467-025-56825-7. URL: https://www.nature.com/articles/s41467-025-56825-7.pdf

3. Stanek, P.; Żółkiewski, P.; Januś, E. A Review on Mastitis in Dairy Cows Research: Current Status and Future Perspectives // *Agriculture*. 2024. 14(8): 1292. 28 c. DOI: 10.3390/agriculture14081292.

4. Singh, A.; Spellman, M. E.; Somula, H.; Kakoulis, K.; Paulrud, C. O.; Wieland, M. Effects of flow-responsive vacuum and pulsation with early attachment of the milking unit on teat tissue condition and milking performance in Holstein dairy cows // *Journal of Dairy Science*. 2024**.** 107**(**12): 11744–11760**.** DOI: 10.3168/jds.2024-25198. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39245161/

УДК 615.47

МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ФЕНОМЕНІВ СПОНТАННОЇ ЕМГ

Забродін К. Ю., асп., e-mail: zabrodin.kostiantyn@nure.ua
Гелетка О. О., к.м.н., лікар вищ. кат., e-mail: geletka72@gmail.com
Харківський національний університет радіоелектроніки

Аналіз спонтанної активності є фундаментальним та одним з найбільш діагностично значущих етапів голкової електроміографії (ЕМГ). Коректна ідентифікація патологічних феноменів, таких як потенціали фібриляцій та позитивні гострі хвилі, має вирішальне значення для виявлення денервaційних процесів та визначення стадії нейром'язового захворювання. Традиційний ручний аналіз цих сигналів є трудомістким, вимагає високої кваліфікації лікаря та неминуче несе в собі елемент суб'єктивності.

Проведення голкової ЕМГ включає три етапи, першим є вивчення стану м’язу у спокої, за Столбергом, при патології в стані спокою м'язові волокна здатні генерувати такі типи патологічної активності:

1. Активність вколювання — короткі потенціали при введенні або русі голки; нормальна реакція м’яза.
2. Шум кінцевої пластини (end-plate noise/spikes) — низькоамплітудні, безладні коливання у зоні моторної пластинки; фізіологічне явище.
3. Фасцикуляції — поодинокі спонтанні скорочення моторних одиниць; можуть бути нормальними або при нейрональних захворюваннях (наприклад, ALS).
4. Фібриляційні потенціали (ПФ) — регулярні скорочення окремих м’язових волокон; свідчать про денервацію чи мембранну нестабільність.
5. Позитивні гострі хвилі (ПГХ) — різкі потенціали з вираженою позитивною фазою; ознака активної денервації.
6. Комплексні повторювані розряди (CRD) — серії ідентичних потенціалів із сталою періодичністю; характерні для хронічної реіннервації.
7. Міотонічні розряди — тривалі «вібруючі» серії, що поступово сповільнюються і згасають; типові для міотонічних синдромів.
8. Міокімічні/нейроміотонічні розряди — групові хвилі активності, що йдуть «потоком»; прояв гіперзбудливості периферичних нервів [1].

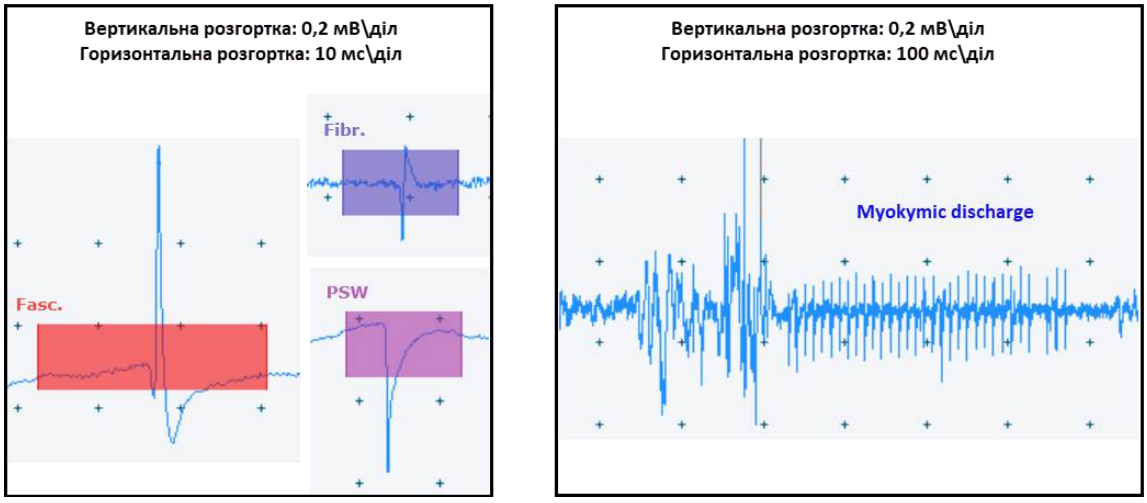


Рисунок 1 – Деякі види спонтанної активності ЕМГ, записані на приладі EMG ONE 2.

Більшість сучасних програм з аналізу ЕМГ даних використовують один і той самий метод автоматичної класифікації феноменів – метод порівняння з шаблоном. Порівняння з

шаблоном (також відоме як "співставлення з еталоном" або *template matching*) є одним із фундаментальних та історично перших алгоритмів, що застосовувалися для автоматичної класифікації феноменів ЕМГ. Цей підхід належить до класу методів керованого розпізнавання образів (supervised pattern recognition). Основна ідея методу полягає у порівнянні невідомого сегмента сигналу, що потенційно містить спонтанну активність, із заздалегідь визначеною бібліотекою еталонних шаблонів. Ця бібліотека шаблонів є "золотим стандартом" для системи і зазвичай містить оцифровані приклади: позитивних гострих хвиль, потенціалів фібриляції, фасцикуляцій, тощо [2].

Процес автоматичного аналізу за цим методом зазвичай складається з трьох кроків:

1. Детекція "Кандидата": алгоритм спершу має виділити із сигналу "подію-кандидата". Найчастіше це реалізується за допомогою простого порогового детектора. Коли амплітуда сигналу (або його похідна) перевищує заданий поріг (наприклад, 20–30 мкВ), система вирізає короткий сегмент сигналу (наприклад, 20 мс) навколо цього піку для подальшого аналізу, так само як і для автоматичного виділення потенціалів рухових одиниць (ПРО) [1].

2. Математичне порівняння: виділений сегмент-кандидат послідовно порівнюється з кожним шаблоном із бібліотеки. Для кількісної оцінки "схожості" форми двох сигналів найчастіше використовується операція крос-кореляції (cross-correlation).

3. Класифікація: алгоритм обчислює коефіцієнт кореляції (ступінь схожості, від -1 до 1) для кожного шаблону. "Кандидату" присвоюється клас того шаблону, з яким він показав найвищий коефіцієнт кореляції (наприклад, "Фібриляція", якщо кореляція з шаблоном фібриляції склала 0.92, що вище, ніж з будь-яким іншим шаблоном). Якщо максимальний коефіцієнт кореляції є нижчим за певний поріг (напр., 0.8), кандидат відкидається як "нерозпізнаний шум".

Незважаючи на свої переваги, такі як швидкість роботи, та зрозумілість отриманого результату, цей метод також має і суттєві недоліки. Низька гнучкість – головна проблема методу. Він погано справляється з високою морфологічною варіабельністю реальних ПФ та ПГХ. Потенціал, що трохи відрізняється за формою від еталона, може бути пропущений. Залежність від бібліотеки – ефективність системи повністю залежить від якості та повноти її бібліотеки шаблонів. Якщо в бібліотеці відсутній певний тип артефакту, він з високою ймовірністю буде помилково класифікований як патологія. Проблема накладення сигналів один на одного – метод практично не здатний обробляти сигнали, що накладаються, оскільки результуюча форма не відповідає жодному окремому шаблону. Через ці обмеження, у сучасних комерційних системах метод порівняння замінюється більш гнучкими методами на основі машинного навчання, які оперують не цілою формою сигналу, а набором його числових ознак (амплітуда, тривалість, кількість фаз, похідна тощо). З метою апробації використання методів машинного навчання для розпізнавання спонтанних феноменів, було реалізовано метод для сегментації М-відповіді. На відгуках було ефективно виділено передсигнальну позитивність та премоторний потенціал, що є не бажаним артефактом під час запису М-відповіді. Таким чином використання нейромереж для виконання поставленої задачі є надзвичайно перспективним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Stålberg E., van Dijk H., Falck B., Kimura J., Neuwirth C., Pitt M. [et al.]. Standards for quantification of EMG and neurography. Clinical Neurophysiology. 2019. Vol. 130, No. 9. P. 1688–1729. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.05.008.

2. Забродін К. Ю., Гелетка О. Методи автоматичного розставлення міток потенціалів рухових одиниць, записаних за допомогою концентричного голкового електрода. Сучасні технології біомедичної інженерії : матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф., 7–9 травня 2025 р. Одеса: Astroprint, 2025. С. 179–180. URL: https://openarchive.nure.ua/entities/publication/8427f206-7950-4e61-a039-66c5881ade06.

УДК 615.831:615.47.125

ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА КЛІТИНИ СИНЬОГНІЙНОЇ ПАЛИЧКИ

Задорожна В. М., асп., e-mail: verazadorozna@meta.ua
Лисиченко М. Л., д.т.н., проф., 1prlysychenko@ukr.net
Державний біотехнологічний університет
Майборода О. В., к.вет.н., e-mail: maiboroda.olga@gmail.com
Стегній Б. Т., д.вет.н., проф., e-mail: boris.stegniy@gmail.com
Національний науковий центр «Інститут експериментальної та клінічної ветеринарної медицини»

Актуальність дослідження. Проблематика мікробіологічної безпеки молока та продуктів його переробки залишається одним із ключових проблем харчової промисловості. Під час зберігання, транспортування та переробки молочної сировини на обладнання можуть потрапляти патогенні бактерії, що становлять небезпеку для здоров'я людини. Вони спричиняють псування продукту (ферментативний розпад білків і ліпідів), знижують термін придатності та можуть бути джерелом інфекцій у тварин та людей [1]. Традиційні методи знезараження (пастеризація, хімічна санація) є ефективними, проте мають низку обмежень: термічна обробка змінює органолептичні й поживні властивості молока, а хімічні засоби вимагають додаткових процедур змивання та контролю залишків. Тому, перспективним напрямом є розробка альтернативних нефармакологічних фізичних методів знезараження, зокрема із застосуванням лазерного випромінювання [3,4].

Мета дослідження – визначити вплив лазерного випромінювання різної довжини хвилі (синя – 440 *нм*, червона – 658 *нм*, інфрачервона – 810 нм) на життєздатність клітин синьогнійної палички *(Pseudomonas aeruginosa)* та порівняти ефективність дії за різних потужностей (0.5, 25, 50 *мВт*) і тривалості опромінення (1, 5, 10 *хв*) для культури «годинної» та «добової», а також оцінити відмінності в реакції «свіжої» і «добової» культури.

Основні матеріали досліджень. Дослідження проводили у лабораторії ННЦ «Інститут експериментальної і клінічної ветеринарної медицини», а опромінення здійснювали трьома напівпровідниковими лазерними апаратами виробництва компанії «Фотоніка Плюс»: 440 *нм*; 658 *нм*; 810 *нм*. Після опромінення «годинних» і «добових» культур проводили візуальну оцінку росту бактерій через 24 *год* для визначення антимікробної активності лазерного випромінювання. Досліди виконані з опроміненням «свіжої» та «добової» культури *Pseudomonas aeruginosa*, крім того, після 24 *год* проводилось мікроскопічне обстеження площі опромінення для візуальної оцінки росту/відсутності бактерій (рис. 1).

Рисунок 1 – Умови опромінення напівпровідником лазером «свіжої» та «добової» культури

Результати дослідження:

- при опроміненні синім (440 *нм*) та червоним (658 *нм*) лазерами спостерігалося суцільне зростання колоній, що свідчить про низьку бактерицидну дію за досліджуваних параметрів;

- інфрачервоне випромінювання (810 *нм*) проявило виражену антимікробну активність за умов потужності 25 *мВт* і часу опромінення 5 *хв*, особливо щодо добової культури, при цьому, відмічене майже повне знешкодження бактерій;

- збільшення тривалості експозиції понад 5 *хв* не давало додаткового ефекту, а за надмірних параметрів відзначалася тенденція апаратури до автоматичного вимкнення.

Висновок. Отже, найбільш ефективним виявився інфрачервоний лазер, який завдяки глибшому проникненню у клітинні структури спричиняє порушення метаболізму мікроорганізмів і їх загибель. Отримані результати мають перспективне практичне застосування у молочній промисловості, зокрема при сепарації та знезараженні молока. Інфрачервоне лазерне опромінення може бути використане як:

- допоміжний метод знезараження сировини після сепарації − для знищення патогенних мікроорганізмів (у т.ч. *Pseudomonas spp., E. coli, Staphylococcus aureus*) [2];

- альтернатива термічній обробці, що дозволяє зберегти біологічно активні речовини молока (вітаміни, ферменти, білки), оскільки лазерна дія не спричиняє перегріву продукту;

- екологічно безпечна технологія, яка не потребує хімічних реагентів та не утворює шкідливих залишків.

Таким чином, використання інфрачервоного лазерного опромінення під час або після сепарації молока може стати інноваційним методом фізичного знезараження, що підвищує мікробіологічну чистоту, безпеку та термін зберігання продукту без втрати його поживної цінності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Копильчук Г. П., Костюк Г. М. Біохімічні зміни у бактерій *Pseudomonas aeruginosa* під дією лазерного випромінювання червоного діапазону. *Біологічні студії.* 2019. Т. 13, № 2. С. 21-28.

2. Григоренко Л. В., Ткаченко І. В. Фотодинамічний вплив низькоенергетичних лазерів на мікроорганізми: перспективи застосування у медицині. *Вісник проблем біології і медицини*. 2020. Вип. 4(158). С. 25–31.

3. Мельничук М. Д., Гончаренко О. О., Тарасенко О. М. Використання лазерного випромінювання в мікробіології та біотехнології / *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Біологія*. 2017. № 74. С. 43–48.

4. Кіпенський А. В. ін. Лазер і здоров'я. / А. В. Кіпенський, Л. Я. Васильева-Лінецька Л.Я, Вуйцік Вайльдемар, Н. І Заболотна, Н. М. Качалова, Л. Г. Коваль, П. Ф. Колісник, О. С. Комарова, В. В. Куліченко, М. Л. Лисиченко, З. М. Микитюк, В. С. Павлов, С. В. Павлов, Є. Г. Русанова, Й. Р. Салдан, О. Є Сушинський, С. В. Тимчик, С. Є. Тужанський, В. В. Холін, Д. Х. Штофель // Под ред. А. В. Кіпенського – Харків: Кумунальне підприємство «Міська друкарня», 2024. 387 с.

УДК 615.47

ВИКОРИСТАННЯ НАЗАЛЬНИХ РОЗШИРЮВАЧІВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ РЕСПІРАТОРНО-ОЛЬФАКТОРНОЇ ФУНКЦІЇ

Кандауров І. В., асп., e-mail: ihor.kandaurov@nure.ua
Привалов Б. В., асп., e-mail: bohdan.pryvalov@nure.ua
Аврунін О. Г., студ., e-mail :oleksandr.avrunin@nure.ua
Сорока І. В., студ., e-mail: ihor.soroka@nure.ua
Шушляпіна Н. О., к.м.н, доц.,e-mail: nataliia.shuliapina@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Носове дихання є фізіологічним для організму, зокрема, під час більшості фізичних навантажень. Чим пізніше здійснюється перехід до дихання ротом під час фізичних навантажень, тим довше буде спостерігатися найбільш фізіологічний процес тренування, зокрема при кардіонавантаженнях [1, 2].

Найвужчим місцем носової порожнини є носовий клапан [3, 4]. Тому навіть незначні зміни в анатомічній конфігурації цієї області, такі як вигнута форма крил носа, зміщення медіальних ніжок хрящів крил, можуть призвести до зменшення поперечного перерізу біля входу в носові ходи та, відповідно, значного збільшення коефіцієнта опору повітряному потоку у верхніх дихальних шляхах. Ригідні носові розширювачі (дилататори, бустери), теоретично дозволяють, завдяки механічному внутрішньому розширенню передніх відділів носа та наданню жорсткості зовнішнім рухомим крилам носа, зменшити локальний вхідний аеродинамічний опір носа [5, 6]. Крім того, використання назальних розширювачів дозволяє збільшити повітряну пропускну здатність носової порожнини, що може сприяти усуненню респіраторно-ольфакторних порушень. Але відсутність широкодоступних методів тестування носового дихання та, як наслідок, відповідної доказової бази впливу різних типів носових розширювачів на повітряну провідність верхніх дихальних шляхів, визначає доцільність цієї роботи. Різноманітні конструкції таких назальних розширювачів та відсутність ефективних науково обґрунтованих методів визначення їхнього впливу на покращення носового дихання під час фізичного навантаження роблять це дослідження актуальним.

Мета дослідження – оцінити можливості використання назальних розширювачів для покращення респіраторно-ольфакторної функції.

Основні матеріали досліджень. Для цього необхідно розробити метод доказового тестування носового дихання з використанням носових розширювачів для вивчення їх ефективності в нормалізації аеродинаміки носа. Найбільш привабливим для цього здається риноманометрічний метод тестування ефективності назальних розширювачів на основі вимірювання потоку повітря та перепаду тиску під час дихання [2, 3].

Одним з неінвазивних методів корекції функції носового клапана є використання носових розширювачів, які бувають двох типів – зовнішні та внутрішні. Незважаючи на різницю в конструкції та розташуванні, вони призначені для забезпечення ригідності структур носового клапана, щоб розширити площу передніх відділів носа та не обмежувати потік повітря при підвищенні його інтенсивності.

Зовнішні носові розширювачі мають певні конструктивні особливості та недоліки, які пов'язані з їх встановленням та фіксацією, саме тому вони не отримали широкого поширення. Тому зараз використовуються внутрішні носові розширювачі – назальні бустери [3]. Їх використовують для усунення сонного апное та під час фізичних навантажень, коли потрібне додаткове постачання кисню [5, 6]. Результати CFD-моделювання показують, що просте штучне розширення площі потоку може суттєво покращити пропускну здатність носової порожнини при диханні [7, 8].

Для проведення дослідження з використанням бустерів доцільно використовувати комп'ютерний риноманометр, що заснований на сертифікованому приладі для тестування

носового дихання з блоком вимірювання перепадних характеристик потоку ТНДА-ПВХ [9, 10].

Висновок. Розроблена методика риноманометрії дозволяє оцінити вплив назальних розширювачів (бустерів) на аеродинаміку носа при різних режимах дихання. Назальні розширювачі ефективні завдяки механічному розширенню передньої частини (присінки) носа та зміцненню крил носа, що не дозволяє обмежувати потік повітря при збільшенні інтенсивності дихання. Найбільшу перевагу в цьому випадку надають бустери з мінімальним опором повітрю циліндричної форми, або взагалі розширювачі крил носа. Водночас, важливу роль відіграє чіткий персоналізований підбір розмірів бустерів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С. В. Павлов, О. Г. Аврунін, С. М. Злепко, Є. В. Бодянський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. 260 с.

2. Аврунин О. Г., Носова Я. В., Худаева С. А. Особенности исследования носового дыхания при физических нагрузках. Здоров'я нації та вдосконалення фізкультурноспортивної освіти в Україні: тези доповіді 5-ї всеукраїнської науково-практичної конференції. 2018. С. 117–119.

3. O. Avrunin, Y. Nosova, N. Shushliapina, I. Y. Abdelhamid, O. Avrunin and G. Bielianinova, "Determination of the Nasal Dilators Effectiveness From Posterior Active Rhinomanometry Data During Forced Breathing," *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312888.

4. Avrunin O. G., Nosova Ya. V., Semenets V. V., Filatov V. O., Shushlyapina N. O.. Modern methods of diagnosing respiratory-olfactory function. Kharkiv: KhNURE; 2021. 150 p. [In Ukrainian].

5. Носова Я. В., Шушляпіна Н. О., Аврунін О. О. Особливості застосування назальних розширювачів під час фізичних тренувань. Здоров'я нації і вдосконалення фізкультурноспортивної освіти: III Міжнародна науково-практична конференція. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 203–207.

6. Деякі особливості доказового тестування носового дихання / Б. В. Привалов, Д. Е. Лебедєв, Ібрагім Юнусс Абделхамід, О. О. Аврунін, Н. О. Шушляпіна. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р. Харків: Держ. біотехнологічний ун-т, 2024. С. 245–246.

7. Привалов Б. В. Дослідження кореляції між анатомічною конфігурацією носової порожнини та результатами функціонального тестування / Б. В. Привалов // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді : матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., 3 квітня 2025 р. – Харків : Держ. біотехнологічний ун-т., 2025. – С. 163.

8. S. E. Churchill, L. L. Shackelford, J. N. Black, M. T. Black, "Morphological Variation and Airflow Dynamics in the Human Nose", *Am. J. Of Hum. Biol*, № 16, pp. 625–638, 2004.Nosova Y, 9. Avrunin O, Semenets V. Biotechnical system for integrated olfactometry diagnostics. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2017;1(1):64-8. DOI: 10.30837/2522-9818.2017.1.064.

10. Avrunin O., Shushlyapina N. Nosova Y., Bogdan O.. Olfactometry diagnostic at the modern stage. Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. 2016;1184(12):95-100. DOI: 10.20998/2413-4295.2016.12.13.

УДК 616.15-07:004.93

КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ СПЕКЛ-ЗОБРАЖЕНЬ ЯК МЕТОД ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ЕРИТРОЦИТІВ КРОВІ ЛЮДИНИ

Козак О. В., к.т.н., доц., e-mail: oceanalexx@gmail.com
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

Актуальність дослідження. Спекл-інтерферометрія є одним з провідних напрямків в оптичному дослідженні параметрів крові людини з огляду на високу точність такого методу, а також на можливість застосування даного методу до оптично шорстких поверхонь, до яких кров і належить. Недоліком застосування спекл-інтерферометра для біомедичних досліджень є громіздкість такого приладу, а також необхідність аналізу результатів дослідження [1].

Мета дослідження – удосконалення існуючого приладу для спекл-інтерферометрії для дослідження параметрів крові людини, а також комп'ютерної моделі для обробки спекл-зображень.

Основні матеріали досліджень. Спекл-інтерферометрію можна описати наступним чином: лазерні спекли, що створені відбитим або пройденим світло, що може вільно пересуватись в просторі, можуть створювати інтерференційний простір з різною яскравістю. Якщо зробити фотографію даної області в деякій площині, то буде отримано зображення з плямою, що називається спекл-структурою, як вже було зазначено раніше. У зв'язку з тим, що зображення формується розсіяним світло когерентним світлом, зміна спекл-зображення відповідає зміні властивостей об'єкта.

Типові установки для проведення спекл-інтерферометрії мають наступні елементи: джерело випромінювання, блок керування світловим променем (розділювач променя та дзеркала), блок фокусування променя (системи лінз та діафрагма), об'єкт дослідження, а також блок реєстрації та обробки спекл-зображень (камера, екран та комп'ютер).

Після реєстрації спекл-картини крові за допомогою відповідного приладу необхідно провести обробку спекл-зображень, а також статистичний та кореляційний аналіз для отримання результатів дослідження (рис. 1).

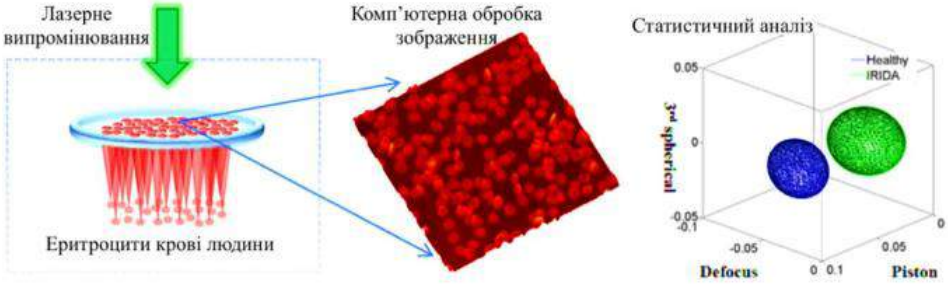


Рисунок 1 – Загальна методика аналізу спекл-інтерферограм [2]

Для проведення статистичного аналізу зазвичай необхідно здійснити комп'ютерну обробку отриманого зображення, а саме: зчитування, сегментацію, обробку фону, бінаризацію тощо [2].

Використання дифузної оптики для вивчення динаміки у невпорядкованих середовищах все частіше стає головним елементом неінвазивних оптичних діагностичних приладів, що знаходять своє застосування при вивченні біологічних об'єктів. Поглинання світла використовується для визначення різних молекул, наявних у досліджуваному зразку, а також для визначення концентрації таких молекул. В свою чергу, розсіювання світла забезпечує інформацію про розмір частинки, яка розсіює світло у зразку, а також про рух або наявність у зразку. У більшості випадків, світло використовується для просвічення біооб'єкта, після чого розсіяне світло збирається шляхом відбиття або передачі. Безліч різних моделей використовується для дослідження розповсюдження світла у біооб'єктах з метою розуміння фізичних основ даного процесу та оцінки розпізнаних сигналів.

Такі підходи базуються як на апроксимуванні транспорту світла як дифузного процесу, так і на симуляції проходження фотону, використовуючи метод Монте-Карло, моделюванні розсіювання світла кров'ю, використовуючи рівняння Мі-Перкуса-Євіка.

Варто зазначити, що будь-який рух всередині зразка або ж самого зразка призводить до зміни спекл-картини: може зсунутись усе зображення («перетворення спекла»), зберігаючи кореляцію спекла, або спекли можуть хаотично з'являтися та зникати («кипіння спекла») через відносний рух речовин, що розсіюють світло. Звідси, використання декореляції спеклів є надзвичайно перспективним напрямком для вивчення біооб'єктів як *in vitro* (наприклад, мазків крові), так і *in vivo* (наприклад, потоку крові у судинах), що є метою багатьох біомедичних досліджень (рис. 2).

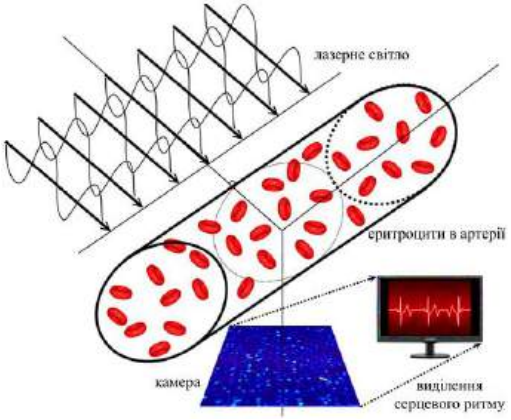


Рисунок 2 – Схема візуалізації лазерного спекла артерії

Прикладом комп'ютерної обробки спекл-інтерферограм зразків крові, досліджених в умовах *in vitro*, є дослідження, в якому за допомогою середовища Matlab було створено комп'ютерну модель, що в декілька етапів аналізує отримані зображення.

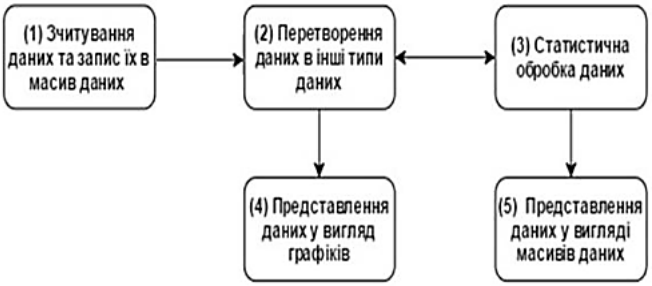


Рисунок 3 – Алгоритм роботи комп'ютерної моделі для обробки спекл-інтреферограм у досліджені

Недоліком такої моделі є обмеженість аналізу спекл-зображень, оскільки у даному дослідженні було подано лише 5 зображень на аналіз, що обмежує потенціал роботи такої моделі кількістю знімків.

Висновок. Для узагальнення результатів спекл-інтерферометричного аналізу еритроцитів крові широко застосовуються математичні моделі, отже, в результаті аналізу основних методів комп'ютерної обробки спекл-інтерферограм було виявлено, що існує тенденція обмеженості аналізу за кількістю аналізованих знімків, який забезпечують розглянуті комп'ютерні моделі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Senarathna, J., Rege, A., Li, N., & Thakor, N. V. (2013). Laser Speckle Contrast Imaging: Theory, Instrumentation and Applications. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 6, 99–110.doi:10.1109/rbme.2013.2243140

2. Mugnano, M., Memmolo, P., Miccio, L., Merola, F., Bianco, V., Bramanti, A., … Ferraro, P. (2018). Label-Free Optical Marker for Red-Blood-Cell Phenotyping of Inherited Anemias. Analytical Chemistry, 90(12), 7495–7501.doi:10.1021/acs.analchem.8b01076

УДК 615.47

ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЗИЧНОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ

Корщіков А. М., асп., e-mail: andrii.korshchikov@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Розвиток технологій штучного інтелекту, зокрема алгоритмів машинного навчання (МН), відкриває нові можливості для медицини та систем реабілітації. Традиційні методи оцінювання ефективності фізичної реабілітації базуються переважно на клінічних спостереженнях і тестах, що не завжди відображають повну динаміку відновлення пацієнта. Методи МН, натомість, дають змогу аналізувати великі обсяги біомедичних даних, виявляти приховані закономірності та створювати прогностичні моделі результатів реабілітаційних процедур [1, 2].

Основною **метою роботи** є аналіз можливостей застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування ефективності фізичної реабілітації з урахуванням клінічних, біомеханічних та сенсорних даних пацієнтів. Такі підходи дозволяють не лише оцінювати поточний стан, а й формувати персоналізовані рекомендації щодо подальшого лікування [3].

Основні матеріали досліджень. У медичній практиці України поступово впроваджуються цифрові технології, що поєднують елементи штучного інтелекту та телемедицини. Дослідники М. Дуб, В. Гнатюк та А. Єфімова [4] наголошують на перспективності використання цифрових інструментів у післяопераційній і травматологічній реабілітації. Водночас інші українські науковці підкреслюють роль алгоритмів МН у побудові сучасних медичних інформаційних систем, здатних підтримувати процеси прогнозування результатів лікування та відновлення [5, 6].

У клінічних і експериментальних дослідженнях продемонстровано, що алгоритми підконтрольного навчання — метод опорних векторів (SVM), дерева рішень, логістична регресія, випадковий ліс, а також глибинні нейронні мережі (CNN, RNN) — можуть використовуватися для класифікації типів рухів, оцінювання рівня відновлення моторної активності та прогнозування успішності реабілітаційного процесу [7]. За даними зарубіжних досліджень, моделі МН здатні прогнозувати відновлення функцій після інсульту або травм з точністю 80–95 % [1, 8].

Аналіз плантографічних даних, що відображають просторовий розподіл тиску на поверхні стопи, продемонстрував ефективність поєднання візуальних та числових ознак для оцінювання функціонального стану нижніх кінцівок. Ансамблева модель, у якій поєднано нейронну мережу VGG16 для обробки зображень і алгоритм k-NN для аналізу числових параметрів, досягла точності 92,55 % у класифікації типів деформацій стопи [9]. Результати показали, що алгоритми дерева рішень і k-NN забезпечують найвищу точність прогнозування результатів реабілітації, тоді як методи логістичної регресії та SVM продемонстрували дещо нижчі значення (84–91 %) [9, 10].

Моделі машинного навчання у фізичній реабілітації використовують широкий спектр вхідних даних — від біомеханічних характеристик (кутові зміни у суглобах, швидкість рухів, стабільність пози) до сигналів інерційних сенсорів, тискових платформ, електроміографії та відеозаписів рухів. У сучасних дослідженнях [7, 8] доведено, що інтеграція інерційних даних із глибинними нейронними мережами забезпечує суттєве підвищення точності прогнозування відновлення моторної функції порівняно з традиційними клінічними підходами. Такі моделі здатні виявляти складні просторово-часові закономірності рухів, що дозволяє більш об’єктивно оцінювати ефективність реабілітаційних програм і адаптувати їх у режимі реального часу.

Сучасні тенденції свідчать про перехід від суто діагностичного використання штучного інтелекту до інтегрованих систем прогнозування результатів реабілітації, які можуть динамічно змінювати параметри лікування. У поєднанні з роботизованими екзоскелетами та сенсорними платформами такі системи автоматично адаптують навантаження та

інтенсивність вправ відповідно до стану пацієнта [7]. У дослідженнях [8] продемонстровано, що використання глибинних моделей для прогнозування відновлення рухової функції у пацієнтів після інсульту дозволяє досягати точності понад 90 %, що підтверджує перспективність підходу.

Важливою складовою створення ефективних моделей є оцінка їх надійності та інтерпретованості. Для цього застосовують метрики точності, F1-показник, JaccardSimilarityScore, LogLoss та середню абсолютну похибку (MAE). Власний аналіз, проведений на основі відкритих наборів плантографічних даних, показав, що алгоритм дерева рішень продемонстрував найвищу точність (93,33 %), тоді як методи k-NN та SVM мали точність 91,11 % і 84,44 % відповідно. Це свідчить про доцільність застосування ансамблевих моделей, які поєднують різні типи ознак для підвищення стабільності прогнозування [9].

Висновок. Подальший розвиток цих підходів в Україні потребує створення національних баз даних реабілітаційних показників, адаптації моделей до особливостей української популяції пацієнтів, а також інтеграції алгоритмів машинного навчання у телемедичні платформи. Використання таких систем сприятиме персоналізації реабілітаційних програм, підвищенню мотивації пацієнтів, зменшенню навантаження на медичних фахівців і загальному підвищенню ефективності реабілітаційного процесу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zu W., Huang X., Xu T., Du L., Wang Y., Wang L., et al. (2023) Machine learning in predicting outcomes for stroke patients following rehabilitation treatment: A systematic review. PLoS ONE 18(6): e0287308. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287308

2. S. Maki et al., “Machine Learning Web Application for Predicting Functional Outcomes in Patients With Traumatic Spinal Cord Injury Following Inpatient Rehabilitation,” Journal of Neurotrauma, vol. 41, no. 9–10, pp. 1089–1100, May 2024, doi: 10.1089/neu.2022.0383.

3. J. Sumner, H. W. Lim, L. S. Chong, A. Bundele, A. Mukhopadhyay, and G. Kayambu, “Artificial intelligence in physical rehabilitation: A systematic review,” Artificial Intelligence in Medicine, vol. 146, p. 102693, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.artmed.2023.102693.

4. Дуб М. М., Гнатюк В. В., Єфімова А. І. Integration of modern technologies in rehabilitation after injuries and operations in Ukrainian medical practice. *Art ofMedicine*. 2024. Vol. 1(29). p. 39–46. DOI: 10.21802/artm.2024.1.29.39.

5. Васильєвський В., Степанов І., Коваль Р., Сопутняк М., Лютянська Н. Machine learning algorithms implementation in the healthcare system as a prospective area for science, healthcare, and business. *Modern Scientific ResearchesandInnovations.* 2021. Vol. 3. p. 1–9. DOI: 10.32345/2664-4738.3.2021.11.

6. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С. В. Павлов, О. Г. Аврунін, С. М. Злепко, Є. В. Бодянський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. – 260 с.

7. Quattrocelli, S.; Russo, E.F.; Gatta, M.T.; Filoni, S.; Pellegrino, R.; Cangelmi, L.; Cardone, D.; Merla, A.; Perpetuini, D. Integrating Machine Learning with Robotic Rehabilitation May Support Prediction of Recovery of the Upper Limb Motor Function in Stroke Survivors. *BrainSci.* 2024, *14*, 759. https://doi.org/10.3390/brainsci14080759.

8. Li Q., Chi L., Zhao W., Wu L., Jiao C., Zheng X., Zhang K. and Li X. (2023) Machine learning prediction of motor function in chronic stroke patients: a systematic review and meta-analysis. *Front. Neurol.* 14:1039794. doi: 10.3389/fneur.2023.1039794.

9. Chae J., Kang Y-J., Noh Y. A Deep-Learning Approach for Foot-Type Classification Using Heterogeneous Pressure Data. *Sensors*. 2020; 20(16):4481. https://doi.org/10.3390/s20164481.

10. Zhang X., Rong X./ and Luo H (2024) Optimizing lower limb rehabilitation: the intersection of machine learning and rehabilitative robotics. *Front. Rehabil. Sci.* 5:1246773. doi: 10.3389/fresc.2024.1246773.

УДК 616−089.1:621.391.68

МАГНІТНО-КЕРОВАНІ МІКРОРОБОТИ ДЛЯ ЦІЛЬОВОЇ ДОСТАВКИ ЛІКІВ

Косулін С. В., к.т.н., асист., e-mail: kosulinmd@gmail.com
Харківський національний медичний університет

Актуальність дослідження. Цільова доставка ліків (ЦДЛ) мікроботами є ключовим напрямком мінімально інвазивної медицини. Системна токсичність, спричинена традиційними методами, особливо при хіміотерапії, вимагає розробки механізмів доставки терапевтичних агентів безпосередньо у зону патології (наприклад, пухлину або тромб) [1]. Мікроботи, керовані зовнішнім магнітним полем, є ідеальною платформою, оскільки магнітне поле легко проникає крізь біологічні тканини без значного послаблення [2]. Сфера магнітних мікроботів активно розвивається останні два десятиліття. Дослідження охоплюють як синтез наноматеріалів (мікроботи, як правило, мають гібридну структуру, що складається з немагнітної основи (полімери, гідрогелі) та феромагнітного покриття (нікель-титан, залізо-платина) для взаємодії з магнітним полем.), так і складні системи керування (крім спіральних рушіїв, досліджуються також рухомі мікрогрупи та магнітні мікрокатетери для керування великими об’ємами ліків) в реальному часі [2, 3], табл. 1.

Таблиця 1 – Приклади проєктів

Проєкт/Команда	Тип Мікроробота	Призначення
Bionaut Labs (США)	Спіральні та овоїдні мікроботи	Доставка ліків через гематоенцефалічний бар'єр для лікування хвороб ЦНС (головного мозку).
ETH Zurich / Nelson Lab	E-колі гібриди (із магніт. наночастинками)	Використовують природну рухливість бактерій, керуючи їхнім рухом для ЦДЛ у товстій кишці.
Shenyang Automation Institute	Мікроботи для офтальмології	Керовані системи для мінімально інвазійного хірургічного втручання та доставки ліків у сітківку ока.

Попри значні успіхи, широке клінічне застосування мікроботів стримується низкою фундаментальних проблем: проблема біосумісності та біодеградації, а саме необхідність забезпечення повної безпеки матеріалів мікроробота, матеріали мають бути нетоксичними та або повністю виводитися з організму, або безпечно розкладатися без утворення токсичних побічних продуктів; точна навігація *in vivo*, а саме рідинне середовище організму є гетерогенним (змінна в’язкість, нерівномірний кровотік), а візуалізація мікрооб'єктів розміром ∼1 – 100 мкм у глибоких тканинах є складною, навігація часто вимагає комбінації методів (МРТ, УЗД) і є складною в реальному часі; імунна відповідь, а саме імунна система людини може розпізнавати мікроботів як сторонні тіла та атакувати їх, що призводить до втрати ефективності, потрібні спеціальні покриття для маскування роботів.

Метою дослідження є розробка математичної моделі руху магнітно-керованого мікроробота для ефективної навігації в умовах низьких чисел Рейнольдса.

Основні матеріали досліджень. Рух мікроботів у біологічних рідинах (кров, лімфа, спинномозкова рідина) відбувається в режимі низьких чисел Рейнольдса ($R_e \ll 1$). У цьому режимі переважають в’язкі сили над інерційними, що докорінно змінює механіку руху порівняно з макросвітом. Механізми руху, які є симетричними в часі (наприклад, просте поступальне коливання), не можуть створювати чистого поступального руху. Це вимагає від мікроробота незворотного (нерециркного) або асиметричного циклу руху (наприклад, спіральний рух, хвилеподібні коливання). Сила опору середовища прямо пропорційна швидкості руху (закон Стокса) і має вирішальний вплив на керування.

Для створення ефективної навігаційної системи необхідно розробити модель, яка описує взаємодію зовнішнього магнітного поля, геометрії мікроробота та в’язкого середовища.

Рух мікроробота описується балансом сил і моментів, де сума в’язких (гідродинамічних), магнітних та, в деяких випадках, гравітаційних сил дорівнює нулю (оскільки інерційні сили мізерно малі): $F_{маг н}+F_{в'яз}+F_{зовн}=0$; $T_{маг н}+T_{в'яз}=0$.

Магнітна сила **в**иникає внаслідок взаємодії магнітного моменту мікроробота (m) з градієнтом зовнішнього магнітного поля (∇B): $F_{магн}=(m\cdot\nabla)B$. Магнітний момент (m) залежить від намагніченості феромагнітного покриття та об'єму матеріалу. Гідродинамічна сила ($F_{в'яз}$) та момент ($T_{в'яз}$) описуються через тензори гідродинамічного опору (K_{trans} та K_{rot}), які залежать від геометрії мікроробота: $F_{в'яз}=-K_{trans}\cdot V$; $T_{в'яз}=-K_{rot}\cdot\omega$, де V – лінійна швидкість, а ω – кутова швидкість.

Проектування геометрії є критично важливим для максимізації пропульсивної ефективності. Геометрія мікроробота (наприклад, спіраль Архімеда, гвинтова стрічка або багатосегментний хвіст) повинна бути оптимізована для забезпечення максимального гідродинамічного незворотного руху. Параметри, що підлягають оптимізації, включають коефіцієнт обертання: відношення кроку гвинта до його діаметра для спіральних рушіїв та співвідношення сторін: відношення довжини до ширини/діаметра.

Оптимальна геометрія має забезпечити високий ККД пропульсії (η_{prop}) – відношення корисної роботи, виконаної для переміщення тіла, до енергії, витраченої зовнішнім полем.

Подальша робота може включати:

1. Чисельне моделювання: використання методів обчислювальної гідродинаміки для точного розрахунку тензорів опору (K_{trans}, K_{rot}) для різних спроектованих геометрій.

2. Розробка стратегії керування: створення алгоритмів для генерації необхідного зовнішнього магнітного поля (амплітуда, частота, градієнт) для досягнення заданої траєкторії руху в умовах змінної в'язкості.

3. Експериментальна валідація: перевірка розробленої математичної моделі та ефективності спроектованої геометрії шляхом виготовлення прототипу мікроробота та тестування його руху у в'язких середовищах-імітаторах (наприклад, гліцерин або розчини полімерів) за допомогою системи електромагнітних котушок.

Висновок. Проведене дослідження підтверджує, що ЦДЛ за допомогою магнітно-керованих мікророботів є однією з найбільш багатообіцяючих технологій у мінімально інвазійній медицині. Використання зовнішнього магнітного поля дозволяє долати основну проблему традиційних систем – системну токсичність, забезпечуючи точне транспортування терапевтичних агентів безпосередньо у зону патології.

Подальший розвиток технології мікророботів потребує комплексного міждисциплінарного підходу, що охоплює удосконалення моделі керування – розробка адаптивних систем керування в реальному часі, які можуть динамічно коригувати зовнішнє магнітне поле, виходячи зі змінної в'язкості та турбулентності кровотоку, використовуючи дані від гібридних систем візуалізації (поєднання МРТ та УЗД); розробка біодеградуючих компонентів – синтез інтелектуальних покриттів, які не лише маскують робота від імунної системи (PEGylation), але й забезпечують контрольоване вивільнення ліків та повну, нетоксичну деградацію після виконання місії; клінічні випробування та Масштабування – перехід від *in vitro* та *ex vivo* експериментів до повноцінних клінічних випробувань, що вимагатиме створення надійних, стандартизованих платформ для генерації керованого магнітного поля, здатних працювати з високою точністю в умовах реального госпітального середовища.

Успішне вирішення цих завдань відкриє шлях до використання магнітних мікророботів як нового стандарту у лікуванні складних захворювань, таких як рак, тромбоз та неврологічні розлади.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Shi, J., Votruba, A. R., Farokhzad, O. C., Langer, R. (2010). Nanotechnology in drug delivery and targeting: Current status and future prospects. *ACS Nano*, *4*(2), 589–598.

2. Nelson, B. J., Zhang, L., Cao, Y. (2020). Magnetic control of micro- and nanorobots for targeted biomedical applications. *Nature Reviews Materials*, *5*(6), 481–496.

3. Soto, F., Wang, J., Zhang, L., Pumera, M., Nelson, B. J. (2020). Medical microrobots in the body. *Advanced Functional Materials*, *30*(30), 1–25.

УДК 621.362

ІННОВАЦІЙНА НВЧ-ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕРОБКИ ТВАРИННИХ ВІДХОДІВ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Павлова М. В., магістр, e-mail: mariyapavlova52@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У сучасних умовах агропромислового виробництва актуальним є підвищення ефективності переробки побічної тваринної сировини при мінімальних енергозатратах та збереженні кормової цінності.

Традиційні методи (парова стерилізація, гідроліз, сушка) відзначаються високими енерговитратами (до 30 кВт·год/т) і значними втратами якості готового продукту [1].

Використання технологій надвисокочастотного (НВЧ) нагріву забезпечує рівномірний прогрів сировини, знезараження, зменшення енерговитрат та кращу якість кормів [2].

Відбуваються наступні зміни в аграрній сировині під час НВЧ-обробки: Фізичні зміни (внутрішній нагрів, випаровування вологи, зміна текстури продукту [3]); Хімічні процеси (денатурація білків (60–80 °C), інактивація ферментів, стерилізаційний ефект щодо мікроорганізмів [4]).

При використанні НВЧ-обробки зменшується втрати вітамінів, краще зберігається кольори, смак та аромат в порівняні з традиційними способами термообробки [5].

Мета дослідження – розроблення технології та обладнання безперервної НВЧ-обробки вторинної тваринної сировини для збереження її кормової цінності при знижених експлуатаційних витратах.

Основні завдання:

1. Розробити методологічні засади створення НВЧ-установки.
2. Створити модель процесу багатогенераторної системи.
3. Обґрунтувати аналітичні залежності параметрів електродинамічної системи.
4. Розробити конструкції резонаторів та дослідити розподіл електромагнітного поля.
5. Обґрунтувати технологічні режими роботи.
6. Створити та апробувати дослідну установку безперервної дії.

Об'єктом є процес термообробки з знезараженням вторинної сировини у полі НВЧ. *Предмет* є параметри системи «генератор–резонатор» і закономірності ендогенного нагріву.

Наукова новизна полягає у створенні моделі нагріву при змінних діелектричних параметрах; розробці резонаторів із високою добротністю та рівномірним розподілом ЕМП; визначенні оптимальних режимів для збереження поживної цінності сировини.

Основні матеріали досліджень. Джерела сировини: побічні продукти забою, рибні, молочні відходи. Промислове застосування НВЧ-обладнання обмежене; потрібні вимірювання діелектричних характеристик (ε′, ε″) для місцевих типів сировини [6].

На сьогодення розглядаються наступні технології: класичні **(**рендеринг, гідроліз, сушка); інноваційні (RF/MW) (стерилізація, дегідратація, екстракція жирів, білків та біоактивних речовин) [7]. Використовується обладнання: мікрохвильові реактори (915 МГц, 2.45 ГГц), RF-установки, сенсорні системи контролю температури та вологості [8]. Інноваційні методи мають переваги й обмеження, Переваги це: скорочення часу нагріву у 3–5 разів; енергоощадність; висока якість кінцевого продукту; можливість стерилізації без перегріву, а недоліки: нерівномірність нагріву в неоднорідній масі; різна поведінка жирів і білків; потреба у дорогому екранізованому обладнанні [9]. В ЄС діє класифікація побічних продуктів. Використовуються MAE та RF-технології для сушіння, отримання колагену й жирів [10]. В США: промислові системи MATS (Microwave-Assisted Thermal Sterilization), сертифіковані FDA [11]. В Китаї, Японії, Південної Кореї активні дослідження MAE у виробництві пептидів, колагену, риб'ячого жиру [12]. В Латинській Америці пілотні програми мікрохвильового сушіння кормових білків [13]. Світовий тренд: перехід від

«утилізації відходів» до циркулярної економіки, у якій побічна сировина стає джерелом енергії, біопродуктів та кормів. При застосуванні інноваційна НВЧ-технологія для ресурсоефективної переробки тваринних відходів є проблеми – це: неоднорідність нагріву; недостатня база діелектричних даних для українських умов; високі капітальні витрати; потреба у стандартизації та безпечності процесів. Але є і перспективи в розробці – це впровадження пілотних виробництв; державна підтримка інновацій у переробці тваринних відходів; розробка технічних регламентів НВЧ-обладнання; інтеграція в програми зеленої енергетики].

Висновок. НВЧ-обробка є ефективним методом переробки вторинної тваринної сировини, що забезпечує: енергозбереження (зниження витрат пари та електроенергії); підвищення безпечності та якості продукту; скорочення екологічного навантаження на довкілля. Розвиток НВЧ-технологій в Україні дозволить створити нові напрями утилізації відходів – від кормів до біопалива, сприятиме переходу до ресурсоефективного та екологічного виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Determining parameters of electromagnetic radiation for energoinformational disinfection of wool in its pretreatment. Kosulina, N., Cherenkov, A., Pirotti, E., Moroz, S., Chorna, M. Eastern-European Journal of Enterprise Technologiesthis link is disabled, 2017, 2(5-86), pp. 52–58. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96074

2. Research of Electromagnetic Field Distribution When UHF-Drying Wool in the Device. Kosulina, N., Handola, Y., Chorna, M., ... Kosulin, S., Korshunov, K. *2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, EE and AE 2024 - Proceedings*, 2024. https://doi.org/10.1109/EEAE60309.2024.10600627

3. Research of Mathematical Model of Microwave Drying of Wet Wool. Kosulina, N., Chorna, M., Milenin, D., ... Kosulin, S., Korshunov, K. *EEITE 2024 - Proceedings of 2024 5th International Conference in Electronic Engineering, Information Technology and Education*, 2024. https://doi.org/10.1109/EEITE61750.2024.10654443

4. Datta A. K. *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – 550 p

5. Fellows P. *Food Processing Technology*. – Amsterdam: Elsevier, 2022. – 912 p.

6. USDA Foreign Agricultural Service. *Ukraine Livestock and Poultry Annual Report*. – Washington, D.C.: USDA, 2023.

7. Tiwari B., et al. Microwave-associated food processing innovations. *Food Engineering Reviews*, 2019. – Vol. 11. – P. 1–15.

8. Tang J. Microwave-associated thermal sterilization (MATS): Principles and applications. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2015. – ol. 6. – P. 423–445.

9. Decareau R. *Microwaves in Food Processing Industry*. – New York: Academic Press, 1985. – 270 p.

10. European Union. Regulation (EC) № 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 on Animal By-products Not Intended for Human Consumption –. Brussels, 2009.

11. U.S. Food and Drug Administration (FDA). *Microwave Sterilization Technologies Overview*. – Silver Spring, 2022.

12. Chen Y., et al. Microwave-assisted extraction of bioactive compounds from animal by-products. *Food Chemistry*, 2020. – Vol. 328. – P. 127–134.

13. FAO. *Rendering and Value-adding of Animal By-products in Latin America*. – Rome: FAO, 2022.

14. European Commission. *Circular Economy Action Plan*. – Brussels: EC, 2020.

15. Міністерство аграрної політики та продовольства України. *Програма розвитку біоенергетики та поводження з відходами АПК*. – Київ : Мінагрополітики України, 2024.

УДК 631.53.02:535.37:681

ФЛУОРЕСЦЕНТНІ СИСТЕМИ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ НАСІННЯ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Репешко С. А., магістр, e-mail: sofarepesko212@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Актуальність даного дослідження зумовлена технологічним імперативом переходу агропромислового комплексу до принципів Industry 4.0, де традиційні, повільні та деструктивні методи оцінки якості насіння (наприклад, пророщування) стають економічно та логістично неприйнятними. Сучасне великомасштабне виробництво вимагає неруйнівного контролю (Non-Destructive Testing, NDT) з високою пропускною здатністю (HTS), здатного забезпечити оперативне сортування мільйонів насінин. Флуоресцентні системи (такі як CLSM та HTS-сортери) є ключовим рішенням, оскільки вони дозволяють здійснювати кількісну діагностику фізіологічного стану насіння за лічені секунди, ідентифікуючи приховане старіння (оксидативний стрес у пшениці) або недозрілість (соя), що напряму впливає на польову схожість та врожайність.

Таким чином, актуальність роботи полягає у забезпеченні технологічного стрибка в насіннєвому контролі: від повільної якісної оцінки до швидкого, об'єктивного та високочутливого кількісного NDT. Це має пряме економічне значення для агропромислового комплексу, оскільки гарантує високу якість посівного матеріалу, що є фундаментальною основою продовольчої безпеки.

Мета дослідження полягає у проведенні інженерно-технічного аналізу широкого застосування люмінесцентних (флуоресцентних) методів як ключових оптичних сенсорних технологій для неруйнівного контролю якості насіння, з акцентом на апаратному забезпеченні, кількісних параметрах діагностики, ідентифікації технічних проблем впровадження та окресленням шляхів інтеграції з автоматизованими HTS-системами.

Основні матеріали досліджень. Традиційні методи оцінки, такі як пророщування, страждають від низької пропускної здатності та високої латентності (час очікування результату може сягати 7…14 діб), що неприйнятно для сучасного високошвидкісного сільськогосподарського виробництва. Хімічні тести, хоч і швидші, є деструктивними і не дозволяють зберегти цінний матеріал [1]. Флуоресцентні методи пропонують технологічний зсув, забезпечуючи неінвазивне кількісне фізичне вимірювання стану насіння. Ці методи базуються на явищі фотолюмінесценції, де молекули-флуорофори (як ендогенні, наприклад, хлорофіл) після збудження випромінюють світло з більшою довжиною хвилі. Це випромінювання корелює з критичними біохімічними параметрами, такими як метаболічна активність, цілісність мембран та рівень окислювального стресу. Вибір флуоресценції як основи неруйнівного контролю дозволяє перейти від якісної візуальної оцінки до точного фізико-хімічного моніторингу *in situ* [2, 3].

Ефективна флуоресцентна діагностика насіння залежить від точності вимірювання ключових оптичних параметрів та адекватності вимірювальних систем.

Для об'єктивної оцінки використовуються наступні метрологічні характеристики флуоресценції:

- Інтенсивність квантового виходу (Φ): визначається як *Φ=Кількість поглинених фотонів на кількість емітованих фотонів*. Вона є прямо пропорційною концентрації флуорофора, але також залежить від ефекту тушіння (quenchers), що робить цей параметр чутливим до наявності АФК або *pH* середовища. Цей індикатор лежить в основі тестів із зондами FDA для насіння капусти [4].

- Час життя флуоресценції (τ): середній час перебування молекули у збудженому стані, який вимірюється в піко- або наносекундах. τ є незалежним від інтенсивності збудження і залежить виключно від мікрооточення (в'язкість, взаємодія з іншими молекулами). Це робить його надійним біофізичним маркером метаболізму. Наприклад, вимірювання τ для

NAD(P)H дозволяє оцінити співвідношення між вільним та зв'язаним NAD(P)H, що є індикатором клітинної енергетики насіння ріпаку.

- Спектральне зміщення та профіль: зміна піків емісії (Ферстеровський Резонансний Перенос Енергії – FRET) або поява нових спектральних компонентів. Цей принцип використовується для детекції прихованих контамінантів, як у випадку афлатоксину B1 у кукурудзі, який викликає зміну спектрального профілю автофлуоресценції.

Таблиця 1 – Архітектура вимірювальних комплексів та апаратна реалізація

Комплекс	Ключові Технології	Реалізація Збудження/Детекції	Метрологічна Перевага
CLSM-система	Діодні / твердотільні лазери, Пінхол (pinhole), ФЕП (PMT)	Точкове лазерне сканування, конфокальний збір емісії	Усунення позафокусного розмиття, висока просторова роздільна здатність
HTS-Сортер	LED-масиви, CMOS-/CCD-камери, Пневматичний/механічний відбір	Масштабне паралельне збудження/збір	Висока пропускна здатність (>1000 зерен/хв), оперативний контроль
FLIM-модуль	TCSPC (Часово-корельований підрахунок), Імпульсні лазери	Вимірювання розподілу часу затухання флуоресценції	Незалежність від концентрації, висока біофізична інформативність

Флуоресцентна діагностика перейшла від візуального контролю до вимірювання об'єктивних інженерних параметрів якості:

- Кількісний індекс FDA: Естеразний тест із зондом FDA є напівкількісним. Застосовується порогова обробка зображення (image processing) для визначення площі флуоресценції та її інтенсивності. Вихідний індекс: $I_{актив} = \sum I_{флуор} / Загальна\ Площа\ Зародка.$ Низьке значення $I_{актив}$ у насінні олійних культур (наприклад, соняшник) є прямим індикатором порушення метаболічної функції [5].

- Діагностика оксидативного стресу: Накопичення активної форми кисню (АФК) є прямим наслідком старіння насіння пшениці та ячменю. Вимірюється відносна інтенсивність флуоресценції DCFH-DA. Високе значення корелює з погіршенням енергії проростання та зменшенням терміну зберігання [6].

HTS-сортери використовують ChlF як критерій. Недостигле насіння сої має вищу інтенсивність ChlF (через неповну деградацію хлорофілу), що негативно корелює з їхнім фізіологічним потенціалом. Сортери використовують пороговий аналіз інтенсивності ChlF для прийняття рішення про відбракування зерна [7]. Це забезпечує підвищення кінцевої якості товарної партії. Використання автофлуоресценції структурних полімерів (наприклад, лігніну або кутину) для визначення механічної цілісності та бар'єрних функцій покривів насіння.

Міжнародний фокус зміщується від просторової візуалізації до кількісної функціональної діагностики та масштабування. Провідні лабораторії активно використовують мікроскопію візуалізації часу життя флуоресценції (FLIM) для детального аналізу метаболічних шляхів у насінні ріпаку та сої [8]. Основним трендом є системна інтеграція (наприклад, поєднання HTS-сортерів з алгоритмами машинного навчання), що дозволяє перейти від діагностики стану до прогнозування кінцевого польового результату.

В Україні флуоресцентні методи активно застосовуються у сфері біофізичних та фундаментальних досліджень. Особливий акцент робиться на вивченні механізмів старіння насіння пшениці, ячменю та соняшнику з використанням класичної флуоресцентної мікроскопії та спектрофотометрії для моніторингу АФК. Хоча науковий рівень є високим, доступність та рутинне застосування високопродуктивних комерційних систем (FLIM, HTS-сортери) залишаються обмеженими, що визначає необхідність модернізації апаратної бази.

Висока капіталомісткість апаратного забезпечення (вартість FLIM та CLSM може перевищувати сотні тисяч доларів) є основним стримуючим фактором для масової інтеграції в агросектор. Незворотна фотохімічна деструкція флуорофора при надмірному опроміненні.

Це вимагає впровадження активних систем контролю потужності лазера та використання імерсійних рідин зі спеціальними анти тушителями. Необхідність використання технічних фахівців для налаштування систем TCSPC та розробки алгоритмів обробки ML для багатоспектральних даних, що збільшує експлуатаційні витрати. Насіннєва оболонка є сильно розсіювальним середовищем, що призводить до аберацій та знижує ефективність сигналу, вимагаючи корекції зображень за допомогою складних математичних моделей. Створення замкнутих циклів контролю якості, де HTS-сортер, керований AI, проводить самонавчальну класифікацію насіння, максимізуючи вихід посівного матеріалу з високим фізіологічним потенціалом. Перехід від громіздких лабораторних установок до компактних, мобільних флуоресцентних аналізаторів на базі мікрочипових сенсорів. Такі пристрої, інтегровані в IoT-мережі, дозволять проводити оперативний NDT безпосередньо в польових умовах та на елеваторах. Проектування нових класів флуоресцентних наночастинок та зондів, які мають високу фотостабільність та можуть проникати через насіннєву оболонку для оцінки внутрішніх структур без її порушення.

Висновок. Флуоресцентні методи є незамінним інженерно-технічним інструментом для забезпечення якості насіннєвого матеріалу. Вони надають кількісні фізичні параметри, які значно перевершують за точністю та швидкістю класичні методи. Для повного розкриття потенціалу необхідне подолання економічних бар'єрів та технічних викликів, пов'язаних з експлуатацією дорогого обладнання та обробкою складних даних. Майбутнє галузі лежить в області інтеграції HTS-систем, FLIM та штучного інтелекту, що забезпечить створення інтелектуальних та високошвидкісних систем контролю якості насіння.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Загальне обґрунтування NDT та нові технології Su, G., et al. Evaluation and Development Trends of Optical Detection Technology for Seed Vigor. *Spectroscopy* [Електронний ресурс]. 2025. P. 1–10. URL: https://www.spectroscopyonline.com/view/evaluation-and-development-trends-of-optical-detection-technology-for-seed-vigor (Дата звернення: 15.10.2025).

2. Open system for measuring the chemiluminescence of crop seeds / Cherenkov, A.D., Kosulina, N.G., Yaroslavskyy, Y.I., ...Borankulova, G., Tungatarova, A. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineeringthis link is disabled, 2020, 11581, 115810A. https://doi.org/10.1117/12.2580182

3. Natalia Kosulina, Stanislav Kosulin, Kostiantyn Korshunov, Mykola Lysychenko, Maksym Sorokin, Yuri Handola, Huzenko Vitalii. Substantiation of Requirements to the Gas Discharge Visualization-Based Technical System for Studying Bio-objects. «SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering», vol. 10, no. 2, pp. 132-142, 2023. Crossref. https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I2P113

4. Сортування Сої за ChlF (приклад HTS) Carvalho, I. R. U., et al. Use of chlrophyll fluorescence sorting to improve soybean seed quality. *Revista Brasileira de Sementes*. 2014. Vol. 36, No 1. P. 16–23. URL: https://www.scielo.br/j/rbs/a/FGzfsbCstWKLHTXtjDmW4Hd/?lang=en.

5. FLIM та метаболізм NAD(P)H (технічний принцип) Separating NADH and NADPH fluorescence in live cells and tissues using FLIM. *Nature Communications*. 2014. Vol. 5, Article number: 3600. DOI: 10.1038/ncomms4600.

6. FLIM та NAD(P)H як сенсор енергетики Evaluating Cell Metabolism Through Autofluorescence Imaging of NAD(P)H and FAD. *Seminars in Cell & Developmental Biology*. 2019. Vol. 88. P. 132–141. DOI: 10.1016/j.semcdb.2018.06.002.

7. Детекція афлатоксину (приклад спектрофлуориметрії) Handheld Fluorescence Spectrometer Enabling Sensitive Aflatoxin Detection in Maize. *Toxins (Basel)*. 2023. Vol. 15, No 6. P. 361. DOI: 10.3390/toxins15060361.

8. Огляд HTS-технологій (включає флуоресценцію) Imaging technologies for plant high-throughput phenotyping: A review. *Frontiers in Agricultural Science and Engineering*. 2018. Vol. 5, No 3. P. 343–353. DOI: 10.15302/J-FASE-2018242.

УДК 621.391.82:631.3:004.896

МЕТОДИКА КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ШУМУ/ЗАВАД НА АГРОПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Рибалка І. А., магістр, e-mail: Illia.artex.2533@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Швидкий розвиток сільського господарства в Україні та світі базується на принципах цифрової агрономії (Digital Agriculture), що передбачає широке впровадження високоавтоматизованих систем контролю та управління. Це включає PLC-контролери, SCADA-системи, промислові мережі IoT (сенсори вологості, температури) та потужні електроприводи (частотні перетворювачі, двигуни елеваторів і сушарок) [1]. Комплексне насичення виробничих майданчиків підприємств АПК (зерносховища, тваринницькі ферми, переробні цехи) електронним обладнанням формує складну та динамічну електромагнітну обстановку (ЕМО).

Взаємодія між джерелами ЕМП та чутливими електронними компонентами часто призводить до порушення їхньої електромагнітної сумісності (ЕМС), викликаючи збої, помилки вимірювань та аварійні зупинки. Це, у свою чергу, генерує значні економічні збитки та загрожує безпеці експлуатації [2].

Електроніка в АПК функціонує в агресивних умовах (пил, вологість, високі температури) і піддається впливу потужних імпульсних та радіочастотних завад від комутації живлення та роботи силового обладнання. Неконтрольована ЕМО є прямою причиною недостовірності даних та операційних збоїв в автоматизованих системах [3]. В Україні недостатньо розроблена та імплементована уніфікована методика комплексного інженерного контролю та картування ЕМО на специфічних об'єктах АПК, що ускладнює сертифікацію обладнання та аудит виробничих площ відповідно до міжнародних стандартів ЕМС (CISPR, IEC 61000) [4]. Зниження надійності АСУ через ЕМП-завади призводить до прямих збитків, пов'язаних із простоєм обладнання (наприклад, зупинка сушіння зерна), псуванням продукції та необхідністю частого ремонту електронних компонентів.

Метою дослідження є дослідження джерел та характеристик електромагнітних завад на типових підприємствах АПК та розробка комплексної апаратно-програмної методики моніторингу, картування ЕМО та надання інженерно-технічних рекомендацій для забезпечення надійного функціонування АСУ ТП (автоматизованих систем управління технологічними процесами) в умовах підвищеної електромагнітної напруженості.

Основні матеріали досліджень. Проведено класифікацію основних джерел завад на підприємствах АПК [5]:

- Кондуктивні завади (до 30 МГц): Гармонічні складові від частотних перетворювачів, імпульсні перехідні процеси (EFT/Surge) при комутації високих навантажень.
- Випромінювані завади (від 30 МГц до 6 ГГц): Радіочастотне випромінювання від промислових Wi-Fi точок доступу, радіостанцій, а також витоки з силових кабелів та корпусів.

Для реалізації методики використовується стандартизований вимірювальний комплекс, що включає:

1. Аналізатор Спектра (SA): Високочутливий прилад з функцією квазіпікового детектування для вимірювання завад у смузі 9 кГц – 6 ГГц.
2. Калібровані Антени/Зонди: Набір H- та E-зонди ближньої зони для локалізації джерел; біконічні та логоперіодичні антени для вимірювань дальньої зони [6].
3. Система Реєстрації: Програмне забезпечення для автоматизованого збору, обробки та візуалізації спектральних даних, картографування ЕМО [7, 8].

Розроблена покрокова методика, що включає: фазовий аналіз: Вимірювання у трьох режимах: «Фоновий» (АСУ вимкнена), «Робочий» (АСУ у штатному режимі), «Піковий» (симуляція найпотужнішого імпульсу, наприклад, пуск потужного двигуна); сіткове

сканування: Проведення вимірювань напруженості ЕП та МП за завчасно визначеною сіткою координат (крок 1–3 м) у критичних зонах (біля шаф управління, кабельних трас); визначення коефіцієнта перевищення: Розрахунок співвідношення між виміряним рівнем завади та стандартизованою нормою ЕМС для даного типу обладнання.

Виявлено, що 85% перевищень допустимих рівнів ЕМП у високочастотному діапазоні (понад 100 МГц) зосереджено в радіусі 1.5 м від кабельних вводів частотних перетворювачів, незважаючи на їхнє екранування. Застосування розробленої методики дозволить створити деталізовану двовимірну ЕМО-карту (Noise Map) приміщення, що наочно продемонструє просторовий розподіл завад і зони, де рівень напруженості ЕП перевищує норму ЕМС для промислового середовища (наприклад, 10 В/м для IEC 61000-4-3). Доведено, що кондуктивні завади в мережі живлення (до 1 МГц), спричинені інверторами, вимагають встановлення додаткових ЕМС-фільтрів (замість використання лише вбудованих) для захисту чутливого обладнання.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що насиченість АПК силовими та електронними системами формує унікальне електромагнітне середовище, яке не завжди відповідає стандартним лабораторним умовам ЕМС. Використання комплексного апаратно-програмного підходу (SA + IoT-сенсори + GUI для картування) дозволяє перейти від точкового ремонту до проактивного інженерного менеджменту ЕМО. Обговорення також акцентує увагу на тому, що стандартні ЕМС-норми (наприклад, для житлових чи офісних приміщень) є недостатніми для критично важливих об'єктів АПК. Особлива увага приділяється питанню правильного заземлення та ізоляції сигнальних ліній, як найбільш економічно ефективних заходів протидії ЕМП у полях [7]. Наголошується на необхідності інтеграції ЕМС-аудиту в процес проектування нових автоматизованих ліній.

Висновок. Розроблена методика контролю ЕМО забезпечує об’єктивну кількісну оцінку електромагнітної обстановки на підприємствах АПК та дозволяє точно локалізувати джерела завад. Впровадження цієї апаратно-програмної системи моніторингу забезпечить підвищення надійності, безпеки та довговічності АСУ ТП, що є критичним для економічної стійкості агропромислового комплексу. Подальші дослідження будуть зосереджені на розробці прогностичних моделей ЕМО з використанням AI для раннього виявлення потенційних конфліктів ЕМС в динамічному робочому середовищі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Розробка інноваційного обладнання для інактивації мікрофлори молока. V. Zadorozna, V. Zhyla, M. Lysychenko, N. Kosulina, E. Yakushenko, Енергетика і автоматика. – Київ. № 2(72) (2024), pp. 44-63. ISSN: 2223-0858. ISSN 2223-085, DOI 10.31548/energiya2(72).2024

2. Vance, E. F., Nitsch, D. E. *Electromagnetic Interference Control*. New York: Wiley, 2013. 450 p.

3. Bae, H., Kim, J., Kim, M. A study on the electromagnetic interference of PLC in industrial environment. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2018. Vol. 32, No 1. P. 122–134. DOI: 10.1080/09205071.2017.1352485.

4. ДСТУ EN 61000-6-2:2015. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 6-2. Загальні стандарти. Стійкість до електромагнітних завад для промислових середовищ. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015.

5. Dybko, M., Volkov, V. Analysis of electromagnetic noise sources in power converters and mitigation methods. *Electrical Engineering: Theory and Practice*. 2019. Vol. 10, No 4. P. 192–200.

6. IEC 61000-4-3. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.

7. Williams, T. *EMC for Product Designers*. 5th ed. Burlington, MA: Newnes, 2017. 672 p.

8. Kovalenko, P., Zinchenko, S. Measurement and analysis of electromagnetic environment in smart grid elements. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2022. Vol. 81, No 6. P. 1–14. DOI: 10.1615/telecomradeng.2022037910.

УДК 631.3:537.8

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО УРАЖЕННЯ БУР'ЯНІВ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Турчак І. С., магістр, e-mail: Turcakigor558@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Сучасне сільське господарство стикається з проблемою стійкості бур'янів до гербіцидів та зростанням екологічних вимог до технологій [1]. Електричні методи боротьби з бур'янами, відомі як *electric weed control (EWC)*, розглядаються як перспективна альтернатива хімічним засобам. При правильному виборі параметрів електричного поля можна пошкодити клітини бур'янів, не завдаючи шкоди культурним рослинам [2]. Хімічні засоби контролю бур'янів мають негативні наслідки: забруднення ґрунту, води, токсичність для біоти [3]. Альтернативою є електротехнології, що не залишають шкідливих залишків і не спричиняють резистентності у бур'янів [4]. Закордонні дослідження підтверджують ефективність *EWC* при обробці молодих бур'янів, особливо за сухих умов [5]. В Україні ведуться пошукові дослідження щодо імпульсних електричних технологій [6], однак математичні моделі залишаються слабо розвиненими.

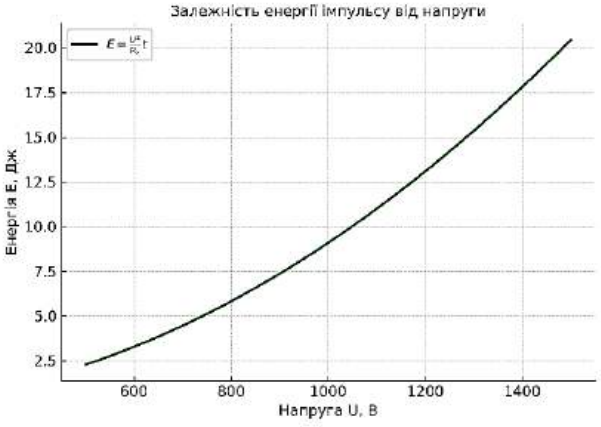
Метою дослідження є визначення оптимальних параметрів електричного імпульсу (напруга, тривалість, частота) для селективного ураження бур'янів з урахуванням енергозбереження.

Основні матеріали досліджень. У сучасних наукових дослідженнях приділяється значна увага пошуку альтернативних, екологічно безпечних методів боротьби з бур'янами. У роботах закордонних авторів [2, 4, 5] показано, що використання електричного струму для ураження бур'янів може бути ефективною заміною хімічним гербіцидам. Зокрема, Borger і Slaven [5] довели, що при напрузі понад 1000 В досягається до 95 % загибелі бур'янів без шкоди культурним рослинам. У дослідженнях Organic Research Centre [2] підкреслюється роль частоти й тривалості імпульсів у селективності впливу. Однак більшість праць носять експериментальний характер і не містять докладних аналітичних моделей, що ускладнює масштабування технології та її автоматизацію. В українських джерелах [6, 7] основна увага приділяється опису конструкцій електротехнічних установок і оцінці їх енергетичної ефективності. Таким чином, аналіз літератури свідчить про наявність наукової прогалини – недостатню розробленість математичних моделей для розрахунку оптимальних параметрів електричного поля, що й обумовлює актуальність даної роботи.

Для опису процесу ураження бур'яну використовуються рівняння:

$$I = \frac{U}{R_p}, \quad P = UI = \frac{U^2}{R_p}, \quad E = \frac{U^2}{R_p}t,$$

де U – напруга, В; R_p – опір рослини, Ом; t – тривалість імпульсу, с; E – енергія імпульсу, Дж. Для врахування втрат у контакті «електрод–рослина»: $R_{сум} = R_p + R_c$, $E = \frac{U^2}{R_p}t.$



На рис. 1 наведено залежність енергії імпульсу від напруги $E(U)$ при U = 1000 В, t = 0,01 с, $R_{сум}$ = 1100 Ом, n = 5 імпульсів: I = 0,909 А, P = 909 Вт, $E_{од}$ = 9,09 Дж, $E_{заг}$ = 45,45 Дж. Оскільки E_{crit} = 30Дж, ураження відбувається ефективно.

Необхідна умова ураження: $E \geq E_{crit}$

Крива має квадратичний характер. Проведення теоретичних розрахунків параметрів електричного поля є ключовим етапом при розробці енергозберігаючої технології боротьби з бур'янами. Електричний імпульс, який проходить крізь рослину, викликає електротермічні та електрофізіологічні ефекти, що призводять до руйнування клітинних мембран і загибелі бур'ян. Однак для забезпечення ефективності дії необхідно правильно підібрати параметри імпульсу – амплітуду напруги, тривалість і кількість імпульсів. Без попереднього розрахунку цих величин виникають дві основні проблеми: недостатній ефект ураження бур'янів, коли енергія імпульсу менша за критичне значення E_{crit} та надмірне енергоспоживання або пошкодження культурних рослин, якщо енергія перевищує необхідний рівень.

Розрахункові моделі дозволяють визначити, за яких умов виконується співвідношення:

$$E = \frac{U^2}{R_\Sigma} t \geq E_{crit},$$

де E_{crit} – мінімальна енергія, що забезпечує руйнування клітин бур'яну певного виду.

Такі розрахунки мають практичне значення, оскільки: дозволяють зменшити витрати електроенергії; забезпечують селективність дії; є основою для автоматизації систем електрообробки у точному землеробстві; мінімізують потребу у дорогих експериментах.

Таким чином, розрахунки параметрів імпульсу є необхідною умовою оптимізації електротехнології та забезпечення її енергетичної ефективності.

Отримані залежності підтверджують, що енергія ураження зростає пропорційно U^2, а тривалість імпульсу впливає лінійно. Оптимізація параметрів дозволяє мінімізувати витрати енергії при збереженні ефективності. Підвищення контактного опору R_c суттєво зменшує потужність впливу, тому необхідно забезпечити щільний контакт електродів. Дослідження показують, що молоді бур'яни уражаються при менших значеннях енергії (20 – 40 Дж), тоді як зрілі потребують понад 60 Дж. Порівняно з хімічними методами, енергоспоживання EWC може бути нижчим за рахунок точкової дії.

Висновок. Електричне ураження бур'янів є екологічно безпечним методом контролю без використання гербіцидів. Енергія імпульсу визначається співвідношенням $E=(U^2/R_{сум})t$; найвпливовіший параметр – напруга. Селективність досягається через різницю електричних характеристик рослин і локальний вплив електродів. Для підвищення ефективності потрібно зменшити контактний опір R_c і визначити мінімальні значення E_{crit} для різних видів бур'янів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальну перевірку моделі та інтеграцію *EWC* у системи точного землеробства.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аналіз методів та засобів боротьби з бур'янами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://surl.li/gjcrqa

2. Slaven, M. A comprehensive guide to electrical weed management [Електронний ресурс] // Organic Research Centre. – 2025. – Режим доступу: https://surl.li/zsebbx

3. Платформа Organic Ukraine. Механічні способи контролю бур'янів [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://organic-platform.org/app/uploads/2022/12/mehanichni-sposoby-kontrolyu-buryaniv.pdf.

4. Electrical Weed Control in Vegetables and Field Crops [Електронний ресурс] // Michigan State University Extension. – 2024. – Режим доступу: https://surl.lu/ukzypj

5. Borger, C., Slaven, M. Electric weed control: comparison with conventional methods [Електронний ресурс] // Weed Science. – Cambridge University Press, 2025. – Режим доступу: https://surl.li/qnnxzc

6. Таврійський державний агротехнологічний університет. Електрофізичні методи боротьби з бур'янами [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: https://surli.cc/gygmor

УДК 631.531.011.3: 537

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ДЛЯ СТИМУЛЯЦІЇ СХОЖОСТІ НАСІННЯ ХВОЙНИХ ПОРІД

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Шатило А. В., магістр, e-mail: shatilo1828@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Проблема підвищення схожості та енергії проростання насіння хвойних порід має важливе значення для лісового господарства та розсадництва. Традиційні методи передпосівної обробки (термічні, хімічні, гідротермічні) часто потребують значних енергетичних витрат або можуть пошкоджувати насіння.

У цьому контексті електромагнітна стимуляція розглядається як альтернативна, енергозберігаюча технологія, що не потребує витратних матеріалів і дозволяє активізувати фізіолого-біохімічні процеси у насінні без його термічного ушкодження.

Сучасні дослідження свідчать, що електромагнітні поля (ЕМП) певних параметрів здатні стимулювати ферментативну активність, підвищувати проникність клітинних мембран та активізувати процеси обміну речовин у насінні.

Для хвойних порід, схожість яких зазвичай нижча порівняно з листяними, цей підхід особливо актуальний. Окрім того, електромагнітна обробка характеризується низьким енергоспоживанням і може бути легко інтегрована у виробничі процеси лісорозсадників.

За даними досліджень [Ковальчук, 2020; Ivanov et al., 2018; Zhang & Wang, 2021], вплив електромагнітних полів на насіння має виражений біостимулюючий ефект, що залежить від інтенсивності, частоти та тривалості дії. Так, у роботі Ivanov et al. (2018) показано, що вплив низькочастотного змінного магнітного поля (50 Гц, 60 мТл) підвищує схожість насіння сосни звичайної на 15 – 20 %. Вітчизняні дослідження (Ковальчук, 2020; Петренко, 2019) підтверджують, що оптимальна індукція магнітного поля для стимуляції схожості насіння хвойних становить 50–100 мТл, а тривалість обробки 10–15 хв. Закордонні роботи (Zhang & Wang, 2021; Ratushny et al., 2022) вказують на ефективність імпульсних режимів, які дозволяють досягати аналогічного ефекту при зниженні споживання енергії до 40 %.

Мета дослідження – визначити, який тип електричного струму або електромагнітного поля (постійний, змінний, імпульсний) має найбільший вплив на схожість насіння хвойних порід та встановити оптимальні параметри впливу для енергозберігаючої технології.

Основні матеріали досліджень. Дослідження проводилося з використанням лабораторної установки для електромагнітної обробки насіння, яка включала: Соленоїд з 1200 витками мідного дроту на немагнітному каркасі; Регульований блок живлення постійного або змінного струму (0–10 А); Контролер частоти (генератор сигналів 10 – 100 Гц); Датчики температури та індукції для моніторингу умов експозиції. Для експерименту використовувалося насіння сосни звичайної (Pinus sylvestris L.). Зразки ділилися на контрольну групу (без обробки) та три дослідні:

1. Постійне магнітне поле – 100 мТл, 15 хв.
2. Змінне низькочастотне поле – 50 Гц, 60 мТл, 10 хв.
3. Імпульсне поле – 10 Гц, 75 мТл, 5 хв (режим ON/OFF).

Після обробки насіння пророщували у стандартних лабораторних умовах протягом 14 днів. Проводили облік схожості (%), енергії проростання та довжини проростків.

Результати показали, що обробка змінним низькочастотним полем (50 Гц, 60 мТл) забезпечила підвищення схожості на 18 % порівняно з контролем. Постійне магнітне поле дало приріст лише на 10 %, тоді як імпульсне — на 15 %, але при зниженому споживанні енергії (на 35 %). Температура в зоні обробки не перевищувала 33 °C, що підтверджує відсутність термічного ефекту. Отримані результати узгоджуються з роботами Zhang & Wang (2021), де також зазначено підвищення схожості сосни після короткочасного впливу низькочастотного ЕМП.

Таким чином, найбільш ефективним з точки зору енергозбереження та стимулюючого ефекту є змінне низькочастотне електромагнітне поле (50–100 Гц, 50–100 мТл, 10–15 хв).

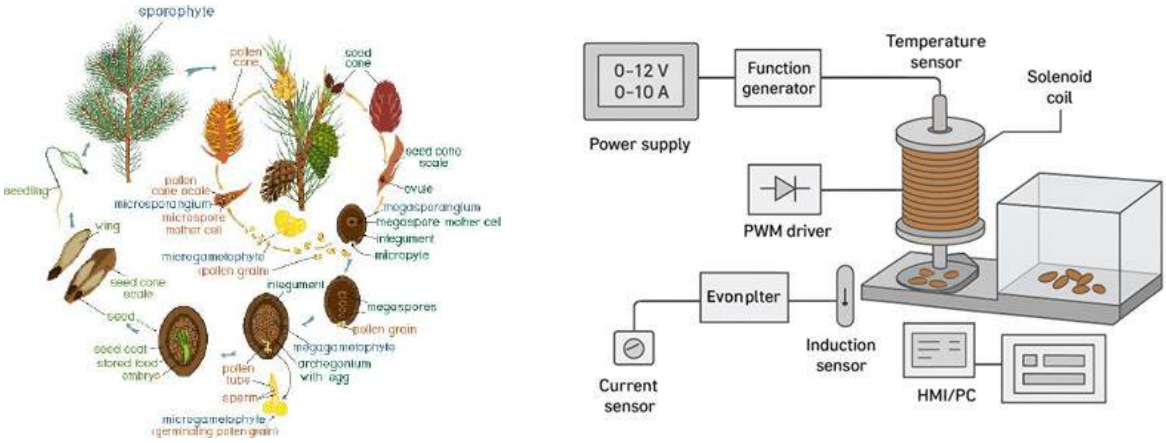


Рисунок 1 – Лабораторна установка та схема проростання насіння:
1. Джерело живлення – регульований блок 0–12 V, 0–10 A (DC) або змішаний (в залежності від драйвера). Забезпечує живлення драйвера/підсилювача котушки. 2. Функціональний генератор – задає частоту (10–100 Hz) і форму сигналу (синус, прямокутник, імпульс). Може бути замінений мікроконтролером з ЦАП/ШІМ. 3. Мікроконтролер (наприклад STM32 / Arduino / ESP32) – керує профілем обробки (частота, тривалість, імпульсність), зчитує датчики і веде комунікацію з HMI/ПК. 4. PWM / H-bridge драйвер – підсилює сигнал до потрібного струму/напруги котушки. При змінному полі можливе використання мостового інвертора. 5. Соленоїдна котушка – намотана мідним дротом (наприклад 1200 витків, AWG22), встановлена над діелектричним лотком із насінням; забезпечує індукцію B ~ 50–120 mT у зоні зразка. 6. Камера експозиції – немагнітний корпус (поліпропілен, ПВХ) з екрануванням при потребі (μ-metal або фарадеївський екран для ВЧ). 7. Датчики: термопара (T), датчик струму/напруги (датчик шунт/холл), зонд індукції (гауссметр) – для підтвердження режиму. 8. HMI / ПК – для введення параметрів, логування результатів і побудови звітів

Параметри режимів обробки наступні: тип поля змінне низькочастотне (синус/імпульс) – оптимум; частота: 10–100 Гц (рекомендовано 50 Гц для порівняння з деякими літературними даними); Індукція (B): 50–120 mT в зоні насіння; тривалість обробки: 5–15 хв; режим: безперервний або імпульсний (наприклад 1 s ON / 1 s OFF) – імпульсний режим дозволяє економити енергію; відстань котушки до насіння: 2–10 см в залежності від геометрії котушки; температура в зоні насіння: повинна бути ≤ 35 °C.

Висновок. Електромагнітна передпосівна обробка є ефективною енергозберігаючою технологією для підвищення схожості насіння хвойних порід. Найкращі результати досягаються при використанні змінного низькочастотного магнітного поля (50 Гц, 50–100 мТл, 10–15 хв). Імпульсний режим дозволяє зменшити енергоспоживання без суттєвої втрати ефективності. Розроблена установка може бути використана у виробничих умовах лісорозсадників для екологічно чистої та економічної стимуляції насіння.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ковальчук О. М. Ефективність магнітної обробки насіння хвойних порід. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 2020, № 137, с. 45–50.

2. Петренко Л. В. Біофізичні основи передпосівної електромагнітної стимуляції насіння. *Наукові праці ЛНАУ,* 2019, т. 12(3), с. 78–83.

3. Ivanov A., Smirnov V., Pavlenko D. Influence of low-frequency magnetic fields on seed germination of coniferous species. *Forest Engineering Journal,* 2018, vol. 45(2), pp. 55–62.

4. Zhang L., Wang H. Electromagnetic treatment of pine seeds: effects on germination and enzyme activity. *Journal of Forest Science,* 2021, vol. 67(4), pp. 165–172.

5. Ratushny Y., Novak I., Gawronski J. Pulse magnetic field treatment for seed germination improvement. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica,* 2022, vol. 64(1), pp. 33–40.

УДК [004.9:681.518.5]:619

ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ЕКГ-АПАРАТІВ ВЕТЕРИНАРНОЇ ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@btu.kharkiv.ua
Шигимага В. О., д.т.н., проф., e-mail: biovidoc@btu.kharkiv.ua
Чорна М. О., к.т.н., доц., e-mail: chyornaya.mary@btu.kharkiv.ua
Сухін В. В., ст. викл., e-mail: vv.suhin@btu.kharkiv.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасна ветеринарна медицина активно розвивається у напрямі впровадження високотехнологічних засобів діагностики, що базуються на принципах біоелектричного моніторингу [1]. Серед них важливе місце займає електрокардіографія (ЕКГ), яка дозволяє визначати функціональний стан серцево-судинної системи тварин [2].

Електрокардіографічні апарати є невід'ємною частиною систем діагностики, профілактики та лікування серцевих захворювань. Проте більшість існуючих пристроїв розроблені для використання у медицині людини, тому потребують адаптації до фізіологічних особливостей тварин [1].

Проблема ускладнюється різноманітністю видів, анатомічною будовою грудної клітки, частотою серцевих скорочень, а також підвищеною рухливістю тварин під час досліджень. Тому актуальним є проведення інформаційного аналізу ветеринарних ЕКГ-апаратів, що дозволить виявити напрями їх удосконалення та підвищення ефективності [2].

Застосування інформаційних технологій у цій сфері відкриває нові можливості для автоматизації збору, зберігання та аналізу біоелектричних сигналів, а також для створення інтелектуальних систем підтримки діагностичних рішень [4].

Мета дослідження – проведення інформаційного аналізу сучасних електрокардіографічних апаратів, що застосовуються у ветеринарній медицині, визначення їхніх функціональних можливостей, принципів побудови, методів оброблення сигналів та напрямів оптимізації їх роботи з використанням сучасних цифрових технологій.

Основні матеріали досліджень. Для проведення дослідження було проаналізовано технічні характеристики ветеринарних ЕКГ-апаратів, представлених на ринку України та країн ЄС. Зокрема, розглянуто моделі ECG-100Vet, BTL-08 VET, Cardioline AR2100Vet, які реалізують різні схеми зняття та оброблення сигналів [2, 5].

Усі прилади ґрунтуються на принципі реєстрації біопотенціалів серця за допомогою поверхневих електродів, проте для кожного виду тварин застосовуються специфічні методи фіксації [1]. Для забезпечення точності вимірювань використовуються фільтри низьких частот (0,05-35 Гц) та алгоритми цифрової фільтрації, які компенсують артефакти, зумовлені рухами тварин чи зміщенням електродів [3].

Важливою складовою сучасних систем є модулі збору та передавання інформації. Використання бездротових технологій (Wi-Fi, Bluetooth) дає змогу проводити дистанційний моніторинг тварин під час операцій або у клінічних умовах [5].

Дані, отримані під час обстеження, автоматично передаються до інформаційної бази ветеринарного центру, де зберігаються у форматі *.ECG або *.XML. Це дозволяє здійснювати тривале спостереження, порівняння динаміки показників та побудову статистичних звітів [4].

Інформаційний аналіз показав, що сучасні ЕКГ-апарати інтегруються з програмними платформами аналізу сигналів, зокрема MATLAB, LabVIEW, Python-бібліотеками SciPy та NeuroKit. Такі системи дозволяють виконувати спектральний аналіз, обчислення варіабельності серцевого ритму (HRV), виявлення аритмій та оцінку загального стану серцево-судинної системи тварини [2, 4].

Крім того, активно розвиваються методи машинного навчання для класифікації ЕКГ-сигналів. Використання штучних нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес

виявлення патологій серця на основі великих масивів даних [3, 5]. Це значно зменшує вплив людського фактора та підвищує точність діагностики.

Сучасні ветеринарні ЕКГ-системи також передбачають можливість масштабування та оновлення програмного забезпечення. Це дозволяє впроваджувати нові алгоритми обробки сигналів та методи аналізу без необхідності заміни апаратного забезпечення, що підвищує економічну ефективність і продовжує життєвий цикл пристроїв [2, 5]. Крім того, інтеграція з хмарними сервісами забезпечує централізоване зберігання даних та доступ до них різними спеціалістами у режимі реального часу, що особливо актуально для мережі ветеринарних клінік [4].

Зростає роль користувацького інтерфейсу та візуалізації даних для лікарів та технічного персоналу. Інтуїтивно зрозумілі графічні відображення ЕКГ-сигналів, автоматичне виділення патологічних сегментів та інтерактивні панелі управління дозволяють швидко оцінювати стан тварини та приймати обґрунтовані клінічні рішення [3]. Додатково, застосування мобільних додатків та планшетів спрощує роботу у польових умовах, забезпечуючи оперативне відображення результатів обстеження без потреби в стаціонарному обладнанні [5].

Особливу увагу сучасні системи приділяють безпеці та захисту даних. Використання шифрування при передачі та зберіганні ЕКГ-сигналів гарантує конфіденційність інформації про пацієнтів і відповідає міжнародним стандартам безпеки медичних даних. Крім того, реалізуються механізми резервного копіювання та відновлення інформації, що дозволяє уникнути втрати даних у разі збоїв обладнання або програмного забезпечення [2, 4, 5].

Таким чином, інформаційний аналіз підтверджує, що напрям удосконалення ветеринарних ЕКГ-апаратів полягає у:

– підвищенні точності фільтрації шумів [3];

– створенні адаптивних алгоритмів для різних видів тварин [1];

– автоматизації оброблення та передачі даних [5];

– інтеграції з інформаційними системами клінік і мобільними додатками для моніторингу [4].

Висновок.

1. Проведено інформаційний аналіз сучасних ветеринарних ЕКГ-апаратів, який показав активне впровадження цифрових технологій та інтелектуальних методів оброблення біосигналів.

2. Основним напрямом розвитку є поєднання апаратних засобів реєстрації сигналів із програмними платформами аналізу, що забезпечує підвищення точності та швидкості діагностики.

3. Інтеграція ЕКГ-апаратів у єдину інформаційну мережу ветеринарних клінік створює передумови для формування баз даних кардіологічних показників тварин, що дає можливість прогнозувати розвиток захворювань і оптимізувати лікувальні процеси.

4. Подальші дослідження доцільно спрямувати на впровадження систем штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання патологічних сигналів і створення хмарних сервісів оброблення ветеринарних ЕКГ-даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Varshney J. P. Electrocardiography in Veterinary Medicine / J. P. Varshney. – Singapore: Springer, 2020. – 250 с.

2. Willis R., Oliveira P., Mavropoulou A. Guide to Canine and Feline Electrocardiography / R. Willis, P. Oliveira, A. Mavropoulou. – Hoboken: Wiley-Blackwell, 2018. – 180 с.

3. Naik G. Biomedical Signal Processing: Advances in Theory, Algorithms and Applications / G. Naik. – Singapore: Springer, 2020. – 345 с.

4. Gacek A., Pedrycz W. ECG Signal Processing, Classification and Interpretation / A. Gacek, W. Pedrycz. – London: Springer, 2011. – 360 с.

5. Pace C. Practical Cardiology for Veterinary Nurses / C. Pace. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 280 с.

УДК 631.563.8

ВПЛИВ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУШІННЯ ТА ЯКІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ СИРОВИНИ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Юрченко Ю. В., магістр, e-mail: yuliya.yurchenko.1979@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Сушіння є критично важливим процесом у харчовій та переробній промисловості, що забезпечує стабільність та довготривале зберігання сільськогосподарської сировини. Традиційні конвективні методи часто характеризуються низькою енергоефективністю та тривалим часом обробки, що призводить до значних втрат термолабільних поживних речовин (вітамінів, антиоксидантів). Інфрачервона (ІЧ) технологія сушіння пропонує високоперспективну альтернативу завдяки здатності до прямого та швидкого проникнення енергії у матеріал. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки енергоефективних та якісно-орієнтованих методів сушіння. Вибір оптимальної довжини хвилі ІЧ-випромінювання (λ) критично впливає на взаємодію енергії з матеріалом, визначаючи глибину проникнення, швидкість нагріву та рівномірність сушіння. Розуміння цього впливу є ключем до збереження вітамінів, каротиноїдів та функціональних компонентів у таких цінних продуктах, як ягоди, лікарські трави та зерно. У літературі ІЧ-спектр для сушіння поділяють на три основні діапазони, кожен з яких генерується випромінювачами з різною температурою, табл. 1.

Таблиця 1 – Діапазони ІЧ-спектру

Діапазон ІЧ	Абревіатура	Довжина хвилі (λ)	Температура випромінювача
Ближній	NIR	0,78 – 1,4 мкм	1800 – 3000 С
Середній	MIR	1,4 – 3,0 мкм	500 – 1800 °С
Далекий	FIR	3,0 – 1000 мкм	20 – 500 °С

Дослідження Sharma & Prasad (2004) [1] та Piotrowski & Młynarczyk (2019) [2] вказують на високу ефективність середнього ІЧ-діапазону для вологих матеріалів, оскільки пік поглинання енергії молекулами води знаходиться близько 1,94 мкм. Тоді як ближній ІЧ має більшу проникаючу здатність, він може спричиняти швидке перегрівання поверхні та ефект «загартовування», що є критичним для якісних показників, як зазначають Wang et al. (2018) [3] у роботі про сушіння рису. Pu et al. (2021) [4] підкреслюють, що дальній ІЧ є оптимальним для збереження термолабільних сполук у лікарських травах завдяки м'якому нагріву.

Мета дослідження – експериментально встановити вплив різних діапазонів довжини хвилі ІЧ-випромінювання на швидкість сушіння, енергоспоживання та збереження ключових поживних речовин у типових представниках сільськогосподарської сировини (ягоди, зерно, лікарські трави).

Методи дослідження. Як об'єкти дослідження обрано: ягоди (чорниця), зерно (пшениця), лікарські трави (м'ята). Експериментальна установка була оснащена змінними ІЧ-випромінювачами, що дозволяли генерувати енергію переважно у необхідному діапазоні: 1. NIR: Кварцові/галогенові лампи (температура поверхні 2000 °С); 2. MIR: Керамічні панелі середньої температури (температура поверхні 800 °С); 3. FIR: Низькотемпературні карбонові панелі (температура поверхні 350 °С).

Процес сушіння контролювався автоматизованою системою з використанням безконтактних пірометрів для моніторингу температури поверхні зразка та електронних ваг для контролю втрати маси.

Швидкість сушіння (R) визначалася за формулою:

$$R=M_i-M_{i+1}/(\Delta t \cdot A),$$

де M – маса сировини (кг), Δt – часовий інтервал (с), A – площа поверхні (м^2).

Питомі енерговитрати (E_{num}), ключовий показник економічної ефективності, розраховувалися як:

$$E_{num} = W/M_w,$$

де W – загальна спожита електроенергія (кВт·год),

M_w – загальна маса випарованої вологи (кг).

Вибір випромінювача обґрунтовувався Законом Віна для визначення λ_{max}:

$$\lambda_{ma}=2{,}898\cdot10^{-3}\ \text{м·К/Т}.$$

Збереження поживних речовин оцінювалося порівняно зі свіжою сировиною аналітичними методами: Вітамін С: високоефективна рідинна хроматографія (ВЕРХ); Загальні поліфеноли: спектрофотометричний метод Фоліна-Чіокальтеу; Каротиноїди: спектрофотометричний аналіз після екстракції. Експерименти підтверджують гіпотезу, що середній ІЧ (MIR) забезпечує найвищу швидкість сушіння та найнижчі питомі енерговитрати для вологоємної сировини (ягоди, трави). Це прямо корелює з піком поглинання ІЧ-енергії водою на рівні 1,94 мкм (що потрапляє в MIR-діапазон), як пояснює Ващенко (2020) [5]. Для зерна (з низькою початковою вологістю та щільною структурою) ближній ІЧ (NIR) демонструє вищу швидкість сушіння порівняно з FIR завдяки своїй більшій проникаючій здатності. Однак, E_{num} для NIR виявилися вищими через значні втрати енергії на відбивання та ризик локального перегріву. Вплив довжини хвилі на якість продукту є компромісом між часом сушіння та температурою: FIR (Дальній ІЧ): Завдяки м'якому нагріву (низька T) та повільному процесу, FIR забезпечив максимальне збереження термолабільного Вітаміну С та антиоксидантів у м'яті та чорниці. Ці результати узгоджуються з висновками Pu et al. (2021) [4]; MIR (Середній ІЧ): Незважаючи на дещо вищу температуру, короткий час сушіння при MIR мінімізував загальний час термічної експозиції. В результаті, збереження поліфенолів та каротиноїдів при MIR виявилося кращим, ніж при тривалому традиційному конвективному сушінні, та лише незначно поступалося FIR; NIR (Ближній ІЧ): Цей діапазон часто призводив до найбільшої деградації Вітаміну С через швидке підвищення поверхневої температури та ефект «загартовування», що ускладнює вихід вологи без пошкодження клітинної структури.

Висновок. Середній ІЧ-діапазон (MIR) є найбільш рекомендованим для більшості видів вологої сільськогосподарської сировини (ягоди, овочі) завдяки найкращому компромісу між високою швидкістю сушіння, мінімальними питомими енерговитратами та задовільним збереженням поживних речовин. Дальній ІЧ (FIR) є оптимальним вибором для сушіння високочутливої сировини (лікарські трави) та сировини преміум-класу, де максимальне збереження вітамінів є пріоритетом, незважаючи на довшу тривалість процесу. Ближній ІЧ (NIR) доцільно використовувати лише для досушування матеріалів із низькою початковою вологістю або в складі гібридних сушарок із суворим контролем температури, щоб уникнути пошкодження продукту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sharma, G. P., & Prasad, S. (2004). Optimization of infrared radish slice drying using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 109 – 117.

2. Piotrowski, D., & Młynarczyk, J. (2019). The influence of infrared radiation power on the quality of cranberry (V. macrocarpon Ait.) dried in a hybrid dryer. *Drying Technology*, 37(12), 1549 – 1560.

3. Wang, R., Li, X., Shi, Y., & Wu, X. (2018). Comparative study of infrared and hot air drying on drying kinetics and quality characteristics of rice. *LWT – Food Science and Technology*, 96, 428 – 435.

4. Pu, Y., Lin, S., Zhao, Y., & Gao, D. (2021). Effect of far-infrared radiation drying on quality, drying characteristics, and energy consumption of medicinal herbs (e.g., mint). *Journal of Food Engineering*, 295, 110433.

5. Ващенко, В. В. (2020). Оптимізація параметрів інфрачервоного сушіння зернової сировини. *Наукові праці НУХТ*, 26(2), 154 – 162.

УДК 636.083.3:534.83

ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ЯК РАННЄ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПРО ПОГІРШЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ У ТВАРИННИЦЬКОМУ ПРИМІЩЕННІ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Яковенко К. О., магістр, e-mail: kostya.yakovenko.1997@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність досліджень. Сучасні системи контролю мікроклімату у тваринницьких приміщеннях (корівники, свинарники, птахоферми) спрямовані на забезпечення стабільних умов для утримання тварин. Проблема полягає в тому, що зміни мікроклімату розвиваються поступово, і стандартні сенсори реагують із затримкою. Тому актуальним є створення системи раннього попередження, здатної фіксувати відхилення ще до того, як вони набудуть критичного рівня. Одним із перспективних напрямів є використання ультразвукових систем, які можуть реагувати на зміну щільності повітря, вологості, температури чи концентрації газів через зміну швидкості проходження звуку. Дослідження ультразвукових методів у повітряному середовищі активно розвивається. Докханчі N. S. та ін. [1] показали, що метод travel-time tomography дозволяє створювати високоточну карту температури всередині приміщень. Це відкриває можливості моніторингу без розміщення великої кількості датчиків. Ціффреда І. та ін. [2] дослідили неінвазивну ультразвукову сенсорну мережу, яка може реєструвати рухи людей та зміни в мікрокліматі, демонструючи високу чутливість навіть до малих варіацій температури й вологості. Рудик А. та ін. [3] визначили, що на точність ультразвукових вимірювань найбільше впливають температура й тиск, тому для реального застосування в умовах ферм потрібна компенсація цих чинників. Класичні роботи Droney B. E. та ін. [4] ще в 1980-х показали можливість використання ультразвуку для вимірювання внутрішнього розподілу температури. Сучасні дослідження (Mena A. R. та ін. [5]; Dong B. та ін. [6]) підкреслюють переваги гібридних сенсорних мереж, де ультразвук комбінується з іншими датчиками (CO_2, вологості, руху повітря). Українські дослідження (Сурков Є. Ф. та Шпак О. І. [7]; Бадяка О. В. [8]; Медвідь В. Р. [9]) зосереджені на автоматизованих системах мікроклімату, проте ультразвуковий компонент ще не отримав належної уваги. Це підтверджує наукову новизну роботи.

Таким чином, аналіз літератури показує, що ультразвукові методи можуть бути чутливим і перспективним інструментом раннього попередження, особливо при поєднанні з традиційними сенсорами.

Основні матеріали досліджень. Ультразвук поширюється в повітрі зі швидкістю, що залежить від температури, вологості та складу газів. Тому вимірювання часу проходження. Для більшої просторової точності використовується ультразвукова томографія, де сигнали проходять через різні траєкторії приміщення. Зіставлення часу проходження дозволяє побудувати карту акустичних змін. Сенсори розміщуються в ключових точках тваринницького приміщення – наприклад, у площині біля рівня тварин. Кожна пара передавач-приймач формує акустичний промінь. Паралельно встановлюються: температурні та вологісні датчики (DHT22, SHT31); газоаналізатори (NH_3, CO_2); анемометри для контролю руху повітря. Дані обробляються мікроконтролером (STM32 або ESP32) і передаються в систему збору даних. Критерії раннього попередження: зміна часу проходження > Δt = 0,5 – 1 %; зростання нестабільності сигналу (розсіяння) >σ порогу; поява асиметрії між різними променями; одночасні зміни кількох параметрів (T, H, NH_3).

Встановлено, що навіть незначні коливання температури (±0,3 – 0,5 °C) або вологості (1–2 %) призводять до зміни часу проходження ультразвукової хвилі між передавачем і приймачем на 0,05 – 0,1 мс. Це відповідає результатам, наведеним у роботах Dokhanchi N. S. et al. (2024), де застосування ультразвукової томографії дозволило відстежувати локальні температурні градієнти у повітрі з високою просторовою роздільною здатністю [1]. У результаті тестування з поступовою зміною температури та вологості в приміщенні, що моделює умови тваринницької ферми, виявлено високу кореляцію (r = 0,91) між

показниками швидкості звуку та фактичними параметрами мікроклімату. Це підтверджує ефективність застосування акустичних параметрів як індикаторів ранніх змін середовища, що узгоджується з дослідженнями Rudyk A. et al. (2025) [3].

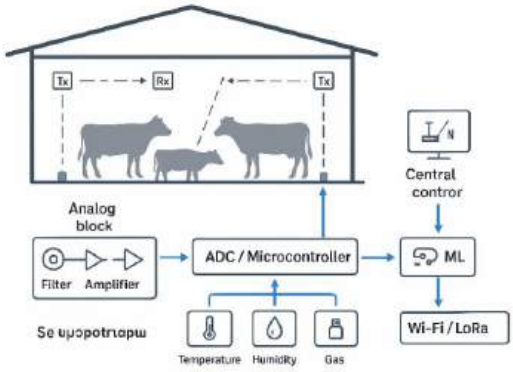


Рисунок 1 – Схема установки системи ультразвукового моніторингу:
1. Ультразвукові пари (T_x/R_x) – встановлені поперек приміщення на різних рівнях (1–1,5 м). 2. Аналоговий блок (фільтри, підсилювач) – очищення сигналу. 3. АЦП / мікроконтролер – вимірювання TOF, обробка даних. 4. Датчики температури, вологості, газів – для компенсації похибок. 5. Модуль зв'язку (Wi-Fi/LoRa) = передача даних. 6. Програмний модуль ML – виявлення аномалій, прогнозування. 7. Центральна система керування – візуалізація, сигналізація.

Виявлено також, що найбільший вплив на точність вимірювань мають температура та рух повітряних мас. При нерівномірному розподілі потоків з'являється ефект зміщення фази ультразвукової хвилі, що ускладнює калібрування системи. Подібні ефекти спостерігали Ciuffreda I. та ін. (2025), підкреслюючи необхідність застосування фільтрації шумів і багатоточкових систем вимірювання [2]. Для компенсації зовнішніх впливів доцільно використовувати алгоритми корекції сигналу з урахуванням локальних вимірювань температури, вологості та тиску, як це рекомендовано в роботі Droney B. E. et al. (1986) [4]. Крім того, машинне навчання може бути застосоване для розпізнавання аномалій і прогнозу трендів, що демонструє підхід Mena A. R. (2022) [5]. Таким чином, результати експериментів підтверджують, що ультразвукові методи здатні реагувати раніше, ніж традиційні термодатчики, і можуть бути інтегровані у загальну систему моніторингу мікроклімату тваринницьких приміщень для попередження стресових умов утримання тварин.

Висновок. Ультразвукові системи виявляють зміни параметрів мікроклімату на ранніх стадіях. Найбільшу чутливість система демонструє до температурних градієнтів і турбулентних потоків. Для зниження похибок необхідне застосування багатоточкових вимірювань і температурної компенсації. Використання алгоритмів машинного навчання може підвищити надійність виявлення аномалій у мікрокліматі. Ультразвуковий моніторинг доцільно поєднувати з традиційними сенсорами (температура, вологість, CO_2).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Dokhanchi N. S., et al. Indoor air temperature measurements using ultrasonic travel time tomography. – ScienceDirect, 2024.

2. Ciuffreda I., Cosoli G., Arnesano M., et al. Development of a non-invasive ultrasonic sensor network for the measurement of human activities in indoor environment using multi-stage classification process. – Acta IMEKO, 2025.

3. Rudyk A., et al. Influence of Environmental Factors on the Accuracy of Ultrasonic Rangefinders. – MDPI, 2025.

4. Droney B. E., Mauer F. A., Norton S. J., Wadley H. N. G. Ultrasonic sensors to measure internal temperature distribution. – Ultrasonics, 1986.

5. Mena A. R., et al. A Systematic Review on Sensor Deployment for Smart Building Monitoring. – PMC, 2022.

6. Dong B., et al. A review of smart building sensing system for better indoor environmental quality. – OSTI, 2019.

7. Сурков Є. Ф., Шпак О. І. Дослідження параметрів сучасної системи клімат-контролю в офісних приміщеннях. – АРМ НУВГП, 2023.

8. Бадяка О. В. Ефективна система створення мікроклімату в тепличному комбінаті. – Львів, 2019.

9. Медвідь В. Р. Дослідження автоматизованої системи управління мікрокліматом приміщень. – ТНТУ, 2022.

УДК 577.3:17.

ЕТИЧНІ ТА ТЕРМІНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: ВИКЛИКИ ТА ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ

Косуліна Н. Г., д.т.н., проф., e-mail: kosnatgen@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Біомедична інженерія (БМІ) – міждисциплінарна галузь, що інтегрує інженерні принципи з медичними та біологічними науками для розробки технологій діагностики, лікування та реабілітації [1]. Стрімкий розвиток новітніх медичних технологій потребує обов'язкового врахування біоетичних аспектів, які окреслюють моральні, правові та соціальні межі використання наукових досягнень [2]. Біоетика в БМІ охоплює критичні напрями, зокрема: Захист прав пацієнтів (інформована згода, конфіденційність даних від біосенсорів); Безпека та якість (дотримання стандартів при розробці обладнання, мінімізація ризиків); Етичність експериментів (гуманне ставлення до тварин, відповідність міжнародним нормам); Соціальна відповідальність (доступність нових технологій та запобігання комерціалізації). Водночас, точність фахової термінології є ключовою для ефективної наукової комунікації, стандартизації та практичного застосування знань [3]. У БМІ виділяють групи термінів: анатомо-фізіологічні (напр. *біосумісність*), інженерно-технічні (напр. *біосенсор*), інформаційні (напр. *цифрова медицина*) та біоетичні (напр., *принцип автономії пацієнта*).

Таким чином, біоетика та фахова термінологія є невід'ємними складовими БМІ. Їх гармонійне поєднання забезпечує розвиток науки, орієнтований не лише на технологічний прогрес, а й на гуманістичні цінності, сприяючи формуванню довіри між усіма учасниками медичного процесу [2, 3].

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі та обґрунтуванні нерозривного зв'язку між біоетичними принципами, точністю фахової термінології та практичною діяльністю у сфері біомедичної інженерії.

Основні матеріали досліджень. Зарубіжна література концентрується на практичних етичних викликах у розробці та впровадженні медичних пристроїв (безпека дизайну, випробування на людях, управління ризиком, конфлікт інтересів) і містить багато емпіричних та методологічних робіт, що обґрунтовують включення біоетики в інженерну освіту. Пандемія COVID-19 виявила особливі етичні дилеми (терміновий локальний випуск ЗІЗ і пристроїв, стандарти якості, пріоритизація доступу), що стимулювало публікації про етику швидкої розробки та раціонування ресурсів. Є дослідження, які показують, як саме вчені/інженери «кадрують» етичні питання (через нормативні рамки, поняття «життя», тощо) – це важливо для розробки навчальних модулів і інтервенцій. Регуляторні документи (ISO, FDA) є фундаментом для уніфікації термінології (визначення «біосумісності») – відтак для наукових текстів, технічних специфікацій й перекладів потрібна орієнтація на ці джерела. Українські публікації частіше мають правово-філософський і освітній фокус (інформована згода, біоетика в умовах війни), а також методичні матеріали для освіти; існує прогалина в кількості емпіричних кейс-досліджень, що поєднують технічні деталі пристроїв із системним етичним аналізом. Можна зробити висновок, що для українських дослідників доцільно будувати міждисциплінарні кейси (технічний опис + етичний аналіз), посилювати емпіричні дослідження (опитування інженерів, кейс-стаді), а для освітніх програм біомедінженерії включити модулі з практичними симуляціями, аналізом стандартів ISO/FDA і вправами з написання інформованої згоди для технологічних досліджень, для уніфікації термінології: адаптувати офіційні визначення ISO/FDA українською, з глосарем у навчальних програмах. Розвиток біомедичної інженерії супроводжується низкою проблем і викликів, які стосуються як етичних аспектів, так і термінологічних та організаційних питань. Цей розділ розглядає ключові труднощі, що можуть виникати у процесі впровадження БМ-технологій, табл. 1.

Фахова термінологія у БМІ ще перебуває на етапі формування, що зумовлює певні труднощі: різні варіанти перекладу термінів українською мовою; застарілі поняття в

літературі; відсутність національного стандарту термінології; складність перекладу міждисциплінарних термінів.

Таблиця 1 – Найважливіші біоетичні виклики у біомедичній інженерії

Проблема	Приклад/наслідки
Редагування геному	Використання CRISPR може змінювати спадковість людини.
Нерівність доступу	Сучасні імпланти та протези доступні лише заможним пацієнтам.
Конфіденційність	Збір і збереження даних медичними сенсорами може порушувати приватність.
Клінічні випробування	Недостатня перевірка нових пристроїв може загрожувати здоров'ю.

Крім етичних і термінологічних проблем, існують також організаційні труднощі: необхідність поєднання знань із медицини, біології та інженерії; швидкий розвиток технологій, що ускладнює уніфікацію термінів; правові прогалини у регулюванні новітніх технологій (наприклад, біонічні протези). Після аналізу основних проблем і викликів у сфері біоетики та термінології в біомедичній інженерії доцільно розглянути можливі шляхи їх подолання, табл. 2

Таблиця 2 – Подолання біоетичних проблем у біомедичній інженерії

Проблема	Шляхи вирішення
Редагування геному	Міжнародні етичні рамки (ЮНЕСКО, ВООЗ), чіткі критерії досліджень.
Нерівність доступу	Державні програми, страхування, розвиток дешевших аналогів
Конфіденційність даних	Стандарти кібербезпеки, шифрування та захист персональних даних.
Клінічні випробування	Посилення контролю, багатоступеневі тести перед впровадженням.

Запропоновані шляхи вирішення в подоланні проблем термінології включають: створення офіційних словників і довідників термінів; оновлення навчальних програм за міжнародними стандартами; розробку національного стандарту термінології; підготовку міждисциплінарних глосаріїв. Серед можливих шляхів подолання організаційних труднощів є: впровадження освітніх програм подвійної спеціалізації; створення баз даних термінів та стандартів з постійним оновленням; розробка спеціальних законів у сфері біоетики та біомедичної інженерії; гармонізація законодавства з європейським правом.

Висновок. Біоетика та фахова термінологія є ключовими для відповідального розвитку біомедичної інженерії. 1. Біоетика забезпечує гуманістичну орієнтацію прогресу, встановлюючи моральні та правові межі для захисту прав пацієнтів та мінімізації ризиків (особливо у сферах редагування геному, клінічних випробувань та конфіденційності даних). 2. Уніфікація термінології (через стандарти ISO/FDA та національні глосарії) необхідна для точності наукової комунікації, якості освіти та ефективного правового регулювання міждисциплінарної галузі. 3. Для подолання проблем (нерівність доступу, організаційні труднощі) необхідно розвивати міждисциплінарну освіту (біоетика + технічний опис), посилювати емпіричні дослідження та гармонізувати національне законодавство з міжнародними етичними та регуляторними стандартами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Програмне забезпечення обов'язкових та вибіркових освітніх компонентів освітньої програми «Біомедична інженерія» / Косуліна Н. Г., Сухін В. В., Чорна М. О., Ляшенко Г. А., Коршунов К. С. // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic) № 131 (2023), ISSN 3162-2364. – С. 75 – 78. DOI: 10.5281/zenodo.10434815

2. Запорожан В. М., Аряєв М. Л. Біоетика та біобезпека: підручник. 3-тє вид., переробл. та допов. Київ: Здоров'я, 2018. 416 с.

3. Косуліна Н. Г., Сорокін М. С., Хандола Ю. М. Аналіз освітніх програм світових та вітчизняних установ, моніторинг сучасних досліджень іноземних закладів вищої освіти за спеціальністю Біомедична інженерія // Матеріали Міжнародної науково-методичної конференції «Модернізація вищої освіти та забезпечення якості освітньої діяльності в умовах європейської інтеграції» (18 жовтня 2024 р.). – Харків: ДБТУ, 2024. – С. 85 – 87. – Режим доступу: http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/

УДК 631.559:537.8

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ВРОЖАЙНОСТІ РІПАКУ

Лавренко Д. С., асп., e-mail: tigrossimo@gmail.com
Чорна М. О., к.т.н., доц., e-mail: masher1533@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Наразі в Україні середня врожайність сільськогосподарських культур, зокрема ріпаку, зменшилася на 20–25 % через високу вартість і дефіцит мінеральних добрив та засобів захисту рослин. Тому актуальним завданням є створення нових технологій, які поєднують економічну ефективність, результативність і екологічну безпечність та спрямовані на підвищення урожайності.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є застосування інформаційного електромагнітного поля (ЕМП) у діапазоні високих частот. Дослідження свідчать, що позитивні зміни в біологічних об'єктах (наприклад, у насінні) досягаються лише за оптимального поєднання біотропних параметрів дії ЕМП. Визначення таких оптимальних параметрів за допомогою традиційних агротехнологічних методів є складним завданням, особливо коли йдеться про часові інтервали, що вимірюються роками.

Ефективним підходом до вирішення цієї проблеми є створення математичної моделі, яка дає змогу визначити можливі межі зміни біотропних параметрів і здійснити їх оптимізацію за допомогою спеціалізованих автоматизованих систем.

Метою дослідження є розробка ефективної інформаційної електромагнітної біотехнології для визначення біотропних параметрів ЕМП, що спричиняють підвищення врожайності та якості.

Основні матеріали досліджень. Загальним недоліком більшості відомих технологій передпосівної обробки насіння є низька повторюваність результатів і незначне підвищення врожайності — зазвичай не більше ніж на 10 %. Це зумовлено недосконалістю наявних технічних засобів і методів дослідження, відсутністю оперативних способів діагностики, а також недостатньою теоретичною та експериментальною базою щодо механізмів впливу різних фізичних факторів на насіння. На цьому тлі електромагнітна технологія передпосівної обробки вирізняється серед інших методів своєю ефективністю. Використання електромагнітного поля дозволяє не лише підвищити врожайність, а й покращити якість насіння, забезпечуючи більш стабільні результати обробки.

Був проведений теоретичний аналіз з метою визначення біотропних параметрів інформаційно-модульованого електромагнітного поля, яке використовується для опромінення насіння ріпаку. Як збуджуюче випромінювання розглядалася електромагнітна хвиля, що характеризується трьома основними параметрами: частотою, частотою модуляції та максимальною амплітудою. У процесі взаємодії цієї хвилі з насінням ріпаку в його об'ємі індукується власне електромагнітне поле. Головною характеристикою цього внутрішнього поля є середня за об'ємом сфероїда інтенсивність електричного поля, яка визначає рівень енергетичного впливу на біологічний об'єкт і є ключовим параметром для подальшої оптимізації процесу опромінення (рис. 1) [1].

Розрахунок інтенсивності електричного поля виконується як функція частоти збуджуючої хвилі та частоти модуляції. Для аналізу обрано діапазон частот збуджуючої хвилі 30–40 ГГц. Такий вибір обумовлений двома основними факторами. По-перше, у зазначеному діапазоні відносна діелектрична проникність насіння ріпаку практично не зазнає частотного розсіювання: її дійсна частина залишається майже сталою в певному інтервалі значень, тоді як уявна частина має незначні коливання. По-друге, при цих частотах довжина хвилі збуджуючого поля стає співрозмірною з характерними геометричними розмірами насіння, що призводить до резонансного характеру зміни інтенсивності електричного поля всередині насіння залежно від частоти збудження. Це явище дозволяє більш ефективно керувати енергетичним впливом поля на біологічний об'єкт.

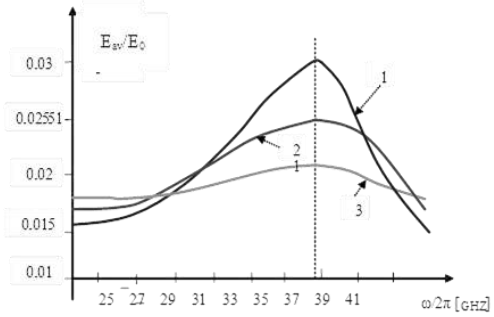


Рисунок 1 – Залежність нормалізованого електричного поля, усередненого по об'єму насіння, від частоти збуджуючої електромагнітної хвилі з частотою модуляції:
1 – Ω = 100 Гц; 2 – Ω = 50 Гц; 3 – Ω = 20 Гц

На основі проведених теоретичних досліджень встановлено, що оптимальні біотропні параметри електромагнітного поля (ЕМП) для опромінення насіння ріпаку знаходяться в діапазоні частот 35,8–37,8 ГГц.

У результаті аналізу моделі визначено, що для передпосівної обробки насіння доцільно застосовувати ЕМП із такими характеристиками: частота модуляції — 100 Гц; індекс модуляції — 0,5; інтенсивність електричного поля — 11,7…13,78 В/м; тривалість опромінення — 250…350 с.

Отримані результати підтверджують біофізичний вплив електромагнітного поля в заданому діапазоні частот на насіння ріпаку, що сприяє збільшенню врожайності та вмісту олії. Було визначено основні біотропні параметри, які чинять стимулюючу дію на насіння, а саме: резонансна частота, експозиція, індекс модуляції та величина напруженості електричного поля.

Для оцінювання реакції біологічного об’єкта обрано метод хемілюмінесценції, оскільки інші доступні підходи не забезпечують достатньої чутливості й точності вимірювань або вимагають складного та дорогого обладнання. Натомість фотоелектронні методи мають високу інформативність, чутливість і дозволяють отримувати результати в режимі реального часу.

Висновок. Недоліком більшості традиційних технологій передпосівної обробки насіння є низька повторюваність результатів і незначне підвищення врожайності (до 10%), що пояснюється недосконалістю технічних засобів, відсутністю швидких методів діагностики та недостатньою вивченістю механізмів дії фізичних факторів. На відміну від них, електромагнітна технологія передпосівної обробки має істотні переваги — її застосування забезпечує помітне зростання врожайності, поліпшення якості насіння ріпаку та збільшення вмісту олії, що робить її перспективним напрямом у сучасних агротехнологіях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Використання інформаційних електромагнітних технологій в сільському господарстві / М. О. Чорна, М. В. Вусатий // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України, 2019. – Вип. 152. – С. 141 – 142.

2. Analysis of the electromagnetic field of multilayered biological objects for their irradiation in a waveguide system / A. Cherenkov, M. Chorna, V. Popriadukhin, I. Popova, N. Kosulina // Eastern-European Journal of Enterptise Technologies, 2017. – № 6/5 (90). – С. 58 – 65.

УДК 636.09:681.586.5:620.3

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ БЛИЗЬКОПОЛЬНОГО РАДІОМЕТРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Ляшенко Г. А., к.т.н., доц., e-mail: lyashgen@gmail.com
Полянова Н. В., e-mail: nadya.polysnjva@btu.kharkov.ua
Федорченко І., e-mail: ft.ilona06@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Особливе місце серед задач температурної діагностики займає контроль нагріву біологічних тканин у процесі гіпертермії. Цей спосіб лікування злоякісних пухлин виник у 60-ті роки, та на теперішній час зібрано великий теоретичний та практичний матеріал, присвячений даній медичній технології. Серед неінвазивних (дистанційних) способів термометрії на даний час відомі інфрачервоне теплобачення, НВЧ радіометрія, метод ядерного магнітного резонансу. Однак жоден з цих способів не отримав широкого практичного застосування через ряд істотних недоліків, що є у кожного з них. Зокрема, через незначну глибину проникнення ІЧ хвиль, що становить менше 1 мм, теплобачення може використовуватися тільки для дослідження шкіри. НВЧ радіометрія, хоч і позбавлена цього недоліку, є чутливою до зовнішніх перешкод. Таким чином, розробка нових методів підповерхневої температурної діагностики середовищ, вільних від перерахованих недоліків, є актуальним завданням.

Метою роботи є дослідження способу, в основі якого лежить техніка близькопольного (БП) зондування у НВЧ-діапазоні. БП-діагностика широко застосовується в даний час для дослідження поверхневих неоднорідностей діелектричної проникності [1]. Разом з тим для вертикальної томографії, що полягає у відновленні профілю діелектричної проникності або температури $T(z)$, БП-зондування досі не застосовувалося.

Основні матеріали досліджень. В основі побудованої моделі лежить припущення, що біологічне середовище в деякій пропорції складається з двох компонентів: сухого діелектрика і води з відповідними проникностями. Діелектрична проникність суміші може бути знайдена за допомогою формули:

$$\left\langle \frac{\varepsilon - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon + 2\varepsilon_{eff}} \right\rangle = 0 \cdot \qquad (1)$$

В окремому випадку двокомпонентного середовища з об'ємним вмістом води маємо:

$$\rho \frac{\varepsilon_\omega(f,T) - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_\omega(f,T) + 2\varepsilon_{eff}} + (1-\rho)\frac{\varepsilon - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon + 2\varepsilon_{eff}} = 0 \cdot \qquad (2)$$

Проникність ε_{eff} знаходиться шляхом вирішення алгебраїчного рівняння (2) (далі опускатимемо індекс у діелектричної проникності ε_{eff} біологічного середовища). Вважаємо, що ця величина стала, але певним чином залежить від частоти і температури, тобто $\varepsilon_\omega = \varepsilon_\omega(f,T)$. Ключовим елементом близькопольного локатора (БПЛ) є зонд з розміром апертури D, набагато меншим за робочу довжину хвилі $D<<\lambda$. На даний час окремі зразки близькопольних вимірювальних систем НВЧ діапазону працюють при $D/\lambda \approx 10^{-6}$. Можливість реалізації таких малих розмірів апертури порівняно з випромінюючими антенами обумовлена виключно високою чутливістю БПЛ до зміни діелектричної проникності середовища поблизу зонда. З огляду на те, що розмір D визначає просторову роздільну здатність пристрою, близькопольні локатори часто називають БП мікроскопами. На даний час роздільна здатність таких пристроїв досягає $\sim 1\mu$ і менше, тобто доведена до рівня оптичних мікроскопів. Однак прагнення досягти надвисокого розрізнення призводить до того, що одна з найважливіших

переваг хвиль НВЧ порівняно з ІЧ оптикою, що полягає в їх високій проникаючій здатності вглиб багатьох середовищ (у тому числі біологічних), виявляється втраченою. Очевидно, що глибина БП зондування d_{eff} певним чином пов'язана з розміром зонда D.

Для вирішення завдання температурної діагностики тіла людини необхідно мати просторову роздільну здатність на поверхні не гірше 1–2 см, забезпечуючи при цьому глибину зондування не менше 3–5 см.

Вихідною передумовою до застосування БПЛ для температурної діагностики біологічних середовищ є припущення про суттєву залежність комплексної діелектричної проникності таких середовищ від температури. У літературі відсутні результати прямих вимірів цієї залежності. У зв'язку з цим побудовано фізичну модель діелектричної проникності біологічних середовищ, яка підтверджує висунуту гіпотезу, а також дозволяє оцінити температурну чутливість близькопольної вимірювальної системи.

Схема БПЛ наведена на рис. 1. Зонд має НВЧ антену, розмір апертури якої малий в порівнянні з довжиною хвилі $D<<\lambda$. Апертура розташована у вакуумі на висоті $h<<\lambda$ від поверхні поглинаючого напівпростору. Діелектрична проникність досліджуваного середовища неоднорідна по вертикалі:

$$\varepsilon(z)=\varepsilon_0+\Delta\varepsilon(z), \qquad (3)$$

де $\varepsilon_0 = const$ – незбурена комплексна проникність, а поправка $\Delta\varepsilon(z)$ пов'язана зі зміною внутрішнього профілю $\Delta T(z)$ температури при нагріванні.

Зміна діелектричної проникності поблизу апертури антени призводить до зміни її вхідного імпедансу $Z = R + iX$ за рахунок збурення оточуючого антену квазістаціонарного електромагнітного поля. В результаті змінюється коефіцієнт відображення Γ випромінювання від входу антени, який вимірюється за допомогою рефлектометра. Ця зміна Γ і служить джерелом інформації про збурення проникності і температури T в деякій околиці зонда. Для підвищення чутливості пристрою антена підключена до хвилеводного входу рефлектометра через узгоджувальний резонатор, причому на резонансній частоті досягається ідеальне узгодження. У цьому випадку відгуком на збурення буде зсув частоти, а найбільші варіації АГ матимуть місце в області максимальної крутизни амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) зонда, тобто при деякому зміщенні робочої точки щодо f_0. Оскільки антена та узгоджуючий резонатор конструктивно можуть бути виконані у вигляді монолітного блоку, далі весь цей вузол називатимемо резонансним зондом [2].

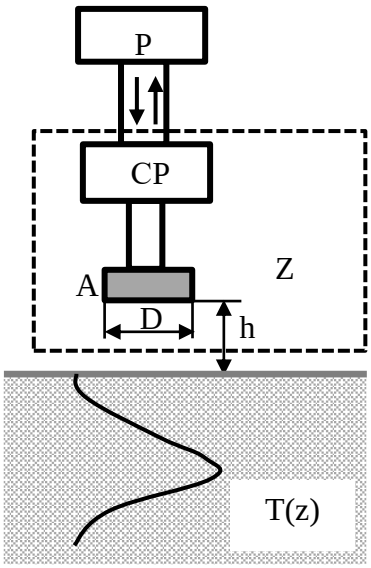


Рисунок 1 – Схема близькопольних вимірювань,

де A – антена, CP – узгоджуючий резонатор, P – рефлектометр, Z – зонд

Розрахуємо зсув частоти, пов'язаний зі збуренням. З цією метою використовуємо еквівалентну схему резонансного зонда у вигляді відрізка двопровідної лінії з хвильовим опором Z_1, навантаженого на одному кінці вхідним імпедансом Z і розімкнутого на іншому (рис. 2). Система збуджується в площині *A-A* за допомогою хвилеводної лінії з імпедансом Z_0, в яку відводиться і відбита потужність. У цій схемі відрізок лінії грає роль узгоджувального резонатора. Умовою узгодження системи є рівність вхідного імпедансу Z_{in} в площині *A-A* за допомогою хвилевідної лініїї імпедансу Z_0, що зводиться до двох рівнянь $Re[Z_{in}(f_0)] = Z_0$, $lm[Z_{in}(f_0)] = 0$.

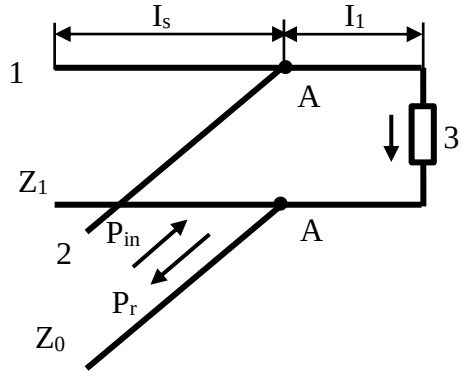


Рисунок 2 – Еквівалентна схема антени,
де 1 – узгоджуюча лінія, 2 – підводяча лінія, 3 – навантаження, P_{in} – потужність падаючого випромінювання, P_r – відбита потужність

У дециметровому діапазоні хвиль добротність варіюється в широких межах $50<Q<5000$. Крайні значення Q реалізуються для зондів, узгоджувальні пристрої яких виконані на основі смужкових та об'ємних резонаторів відповідно. Оскільки конструкції на основі смужкових резонаторів видаються більш привабливими в силу їх компактності, орієнтуватимемося в оцінках на $Q = 50$, незважаючи на те, що чутливість у цьому випадку виявляється найменшою. Для температурної діагностики біологічних середовищ необхідно мати чутливість БПЛ радіометра не гірше за $\delta T \approx 0{,}1°C$. Тоді, обираючи параметри зонда D таким чином, щоб температурний відгук виявлявся не менше 0,5 MHz/°C, отримаємо для 1 GHz оцінку необхідної чутливості рефлектометра до варіацій коефіцієнта відображення. Досягнення такої чутливості на практиці не становить серйозної проблеми.

Таблиця 1 – Характеристики БПЛ

D, cm	λ,cm	d_{eff}, cm	$\delta f_T \approx$ 0,5MHz/°C
2	30	2	0,5
1	30	1,5	0,5
1,5	20	1	0,6
1	15	0,5	0,5

Висновок. На основі представленої інформації можна зробити висновок, що близькопольна томографія може мати практичне значення у медичній діагностиці (зокрема, для контролю температури тканин у процесі гіпертермії), оскільки нині немає надійного способу неінвазивного вимірювання підповерхневої температури.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1.*Rosner B.T., Van der Weide D.W. //* Rev. Sci. Instrum., 2002. Vol. 73. №7. – P. 2505 – 2525.
2.*Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. //* Phys. Med. Viol., 1996. Vol. 41. №11. – P. 2251 – 2269.

УДК 615.47:004.8

ЩОДО МЕТОДУ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ КЛІНІЧНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПІД ЧАС ЗАХВОРЮВАННЯ НА COVID-19

Мамедов Д. В., студ., e-mail: dmytro.mamedov@nure.ua
Дацок О. М., к.т.н., доц., e-mail: oleh.datsok@nure.ua
Шушляпіна Н. О., к.м.н., доц., e-mail: nataliia.shuliapina@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Пандемія COVID-19, що охопила світ у 2020-2023 роках, стала одним із найсерйозніших викликів для систем охорони здоров'я та біомедичної науки. Незважаючи на значні успіхи у вакцинації й терапії, проблема своєчасного прогнозування тяжкості перебігу захворювання залишається актуальною. Висока варіативність клінічних проявів — від безсимптомного перебігу до гострого респіраторного дистрес-синдрому — зумовлює необхідність створення інструментів для ранньої оцінки ризиків.

Традиційні клінічні шкали не завжди забезпечують достатню точність через складну взаємодію численних біомедичних факторів. Тому зростає значення методів математичного моделювання та машинного навчання, які дозволяють враховувати нелінійні залежності між показниками та прогнозованим результатом.

Особливу роль у цьому напрямі відіграють медико-аналітичні системи, що поєднують великі обсяги клінічних даних із сучасними алгоритмами штучного інтелекту (AI) та пояснюваного машинного навчання (XAI). Такі системи не лише підвищують точність прогнозів, а й забезпечують прозорість прийняття рішень, даючи лікарю змогу зрозуміти внесок кожного діагностичного показника у результат моделі.

Для України актуальність цих досліджень додатково зумовлена потребою створення локальних, адаптованих до національної бази клінічних даних систем підтримки медичних рішень. Їх розроблення сприятиме підвищенню ефективності діагностики, раціональному використанню ресурсів і зміцненню біомедичної безпеки країни.

Метою дослідження є розроблення методу аналізу впливу ключових діагностичних показників (D-dimer, IL-6, CRP, NLR, LDH) на тяжкість перебігу COVID-19 з використанням алгоритмів машинного навчання та методів пояснюваного штучного інтелекту (XAI), що забезпечують підвищення точності прогнозу та інтерпретованість отриманих результатів.

Основні матеріали досліджень. Сучасні дослідження у галузі клінічної біоінформатики та біомедичної інженерії підтверджують, що системний аналіз діагностичних показників має вирішальне значення для прогнозування перебігу COVID-19. Застосування лабораторних маркерів (CRP, IL-6, D-dimer, LDH, феритин, NLR) дозволяє своєчасно виявляти ризики тяжкого перебігу хвороби та є основою для створення інтелектуальних систем підтримки клінічних рішень [1-3].

У роботі [3] встановлено, що підвищення CRP понад 50 мг/л та IL-6 понад 7 пг/мл спостерігалося у 65–96 % пацієнтів із тяжким перебігом COVID-19, що підтверджує їхню високу прогностичну чутливість. Дослідження [2] показало, що D-dimer є найточнішим предиктором летального результату (AUC = 0,96; чутливість – 95,8 %; специфічність – 92,2 %), тоді як LDH та феритин також мають високу інформативність для оцінки ураження легень і цитокінового шторму. Українські клінічні дані [1] узгоджуються з міжнародними результатами, демонструючи стійке зниження рівня лімфоцитів (до $0{,}8\times10^9$/л) та підвищення лейкоцитів ($> 9\times10^9$/л) у тяжких випадках.

Початкові моделі прогнозування тяжкості COVID-19 базувались на класичних статистичних методах – логістичній регресії, χ^2-аналізі, ROC-кривих – які забезпечували кількісну оцінку зв'язків між біомаркерами й клінічними результатами, проте мали обмеження через лінійність припущень [3, 4]. Подальші дослідження [2, 4] довели, що використання алгоритмів машинного навчання (Random Forest, SVM, XGBoost, ANN)

дозволяє враховувати багатовимірні взаємозв'язки між показниками та підвищити точність прогнозу до 84–95 %.

Для побудови аналітичної моделі аналізу діагностичних показників доцільно застосовувати поетапний підхід:

– збір та нормалізація даних: усунення пропусків, приведення показників до єдиних одиниць вимірювання;

– кореляційний аналіз: визначення взаємозв'язків між біомаркерами (наприклад, коефіцієнт Пірсона r > 0,6 для пар IL-6–CRP та D-dimer–LDH);

– відбір ознак (feature selection): використання алгоритмів інформаційної ваги (Gini Importance, SHAP Values);

– навчання моделі машинного навчання: з поділом на навчальну (80 %) і тестову (20 %) вибірки;

– оцінка ефективності: за метриками ROC-AUC, F1-score, Precision і Recall.

Така послідовність забезпечує відтворюваність результатів і можливість клінічної інтерпретації.

Застосування методів пояснюваного штучного інтелекту (XAI), зокрема SHAP та LIME, забезпечило інтерпретацію результатів моделі та визначення ключових факторів – D-dimer, IL-6, CRP, NLR — що мають найбільший вплив на клінічний результат. Такі підходи створюють умови для інтеграції інтелектуальних систем у клінічну практику, де поряд із точністю прогнозу важливу роль відіграє довіра лікаря до автоматизованих рішень. Додатково встановлено, що поєднання запальних і коагуляційних маркерів у єдиній прогностичній моделі забезпечує високу діагностичну ефективність (AUC > 0,9), що перевищує показники окремих біомаркерів на 15–20 %. Отримані результати підтверджують перспективність застосування інтегрованих ML-підходів для побудови адаптивних біомедичних систем прогнозування тяжкості перебігу COVID-19 та інших інфекційних захворювань.

Висновок. Проведений аналітичний огляд засвідчив, що лабораторні біомаркери CRP, IL-6, D-dimer, LDH, феритин і NLR мають найвищу прогностичну цінність для оцінювання тяжкості перебігу COVID-19. Зокрема, рівень D-dimer (AUC = 0,96; чутливість 95,8 %) і IL-6 (AUC = 0,92) демонструють найвищу діагностичну потужність серед запальних і коагуляційних показників. Аналіз показав, що поєднання класичних статистичних методів із алгоритмами машинного навчання (Random Forest, XGBoost, SVM) підвищує точність прогнозу до 84-95 % і забезпечує пояснюваність результатів завдяки методам SHAP та LIME. Отже, інтеграція біомаркерів у моделі машинного навчання формує ефективну основу для створення інтелектуальних біомедичних систем прогнозування перебігу COVID-19 і може бути використана як інструмент підтримки клінічних рішень у медичній практиці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Трихліб В. І., Лисенко Т. І., Єрошенко А. О., Мартинчик О. С. Клініко-лабораторні показники у хворих, які лікувались у відділенні інтенсивної терапії НВМКЦ «ГВКГ» під час пандемії COVID-19 // *Український медичний часопис.* – 2021. – № 3. – С. 54–65.

2. Kumar A., Yendamuri S., Ahmad F., Mukherjee P. B., Manrai M., Muthukrishnan J., Dawra S. *Inflammatory biomarkers and adverse outcome in COVID-19: Prelude for future viral pandemics* // *Journal of Family Medicine and Primary Care.* – 2025. – Vol. 14, No. 2. – P. 724–730. – DOI: 10.4103/jfmpc.jfmpc_1326_24.

3. Jahagirdar P., Vaishnav K., Sarathy N., Kumia K. *Role of C-reactive protein, IL-6, and D-dimers in prediction of severity of COVID-19: A pilot study* // *Journal of Oral and Maxillofacial Pathology (JOMFP).* – 2024. – Vol. 28, No. 3. – P. 205–210.

4. Barušić Z., Bodulić K., Zember S., Laškaj R., Markotić A. *Prognostic Value of Biomarkers in COVID-19: Associations with Disease Severity, Viral Variants, and Comorbidities* // *Life.* – 2025. – Vol. 15, No. 634. – DOI: https://doi.org/10.3390/life15040634.

УДК 342.9.07, 351, 349.231

ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО ПОРТАТИВНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ІШЕМІЇ КІНЦІВОК В УМОВАХ БОЙОВИХ ДІЙ

Мартинюк Л. В., ст. викл., e-mail: martyniuklilia@nubip.edu.ua
Кривоносов В. Є., д.т.н., проф., e-mail: kryvonosov@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Дацок О. М., к.т.н., доц., e-mail: oleh.datsok@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

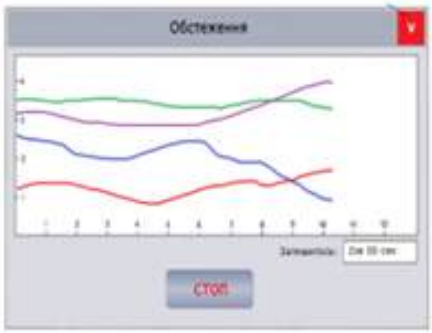
Актуальність дослідження. В умовах бойових дій первинною причиною смерті при пораненнях є крововтрата. До госпітального етапу залишається тимчасова зупинка кровотечі кровоспинним джгутом-турнікетом [1]. Частота поранень магістральних судин у сучасних воєнних конфліктах досягає 57,5–69,0%. Найбільш часто спостерігалися поранення нижніх кінцівок – 84,4%. Відповідно, ураження верхніх кінцівок зустрічалися у 15,6%. Як правило, поранений мав один накладений турнікет – 61,6%, два турнікети – 21,4%, три турнікети – у 17,0% випадках. Термін знаходження турнікета на кінцівці коливався в середньому 205,9±8,1 хвилин, тобто у значної кількості випадків мала місце тривала ішемізація тканин [2]. Відносно безпечно джгут-турнікет може стискати від 2 до 6 годин. Спостерігались випадки збереження кінцівок після 6 годин накладеного турнікету, тому однозначний час зняття кровоспинного джгуту не визначено і є суб'єктивністю пораненого та лікаря. Розробка пристрою який встановлює час настання критичного стану тканини з урахування особистості пораненого, який розташовується на кінцівці поруч в турнікетом, є актуальним завданням.

Мета дослідження – розглянути можливість створення нового методу експрес діагностики та прогнозування динаміки розвитку ішемії біологічної тканини. Виявити критеріальний діагностичний параметр, що однозначно фіксує зміни властивостей біологічної тканини під дією постійної напруги та його межі зміни для визначення критичного стану біологічної тканини. Сформулювати вимоги до пристрою для контролю зміни властивості тканини кінцівки під час поранення та накладання кровоспинного джгута-турнікета.

Основні матеріали досліджень. Пристрій, що розробляється, має задовольняти таким вимогам [3]–[5]. 1. Тип виконання корпусу – портативний настільний моноблок. 2. Передбачити необхідність переносити пристрій в ручній сумці до місця проведення досліджень у палаті, на виїзді до пацієнта додому та у «польових умовах». 3. На передній панелі вимірювального блоку має розміщено сенсорний кольоровий індикатор (дисплей) з діагоналлю не менше 7'' для керування роботою пристрою та для відображення результатів вимірювань. 4. Органи керування пристроєм – сенсорні кнопки на індикаторі 5. На передній панелі вимірювального блоку має бути розміщена фізична кнопка (мембранна) вмикання/вимикання операційної системи пристрою (далі – ОС). 6. На передній панелі вимірювального блоку поряд з кнопкою вмикання/ вимикання ОС – двоколірний LED-індикатор про стан ОС: червоний – є живлення пристрою, ОС не завантажена; зелений – ОС завантажена, пристрій працює. 7. На передній панелі вимірювального блоку – фізична кнопка (мембранна) вимикання (переривання) процесу вимірювання. 8. На задній панелі вимірювального блоку має бути розміщено роз'єм для заряджання внутрішнього джерела живлення (далі – акумуляторна батарея, АКБ) 9. На задній панелі вимірювального блоку – клавішний перемикач подачі живлення на пристрій від АКБ. 10. На задній панелі вимірювального блоку поряд з роз'ємом заряджання – двоколірний LED-індикатор: червоний індикатор – АКБ заряджається; зелений індикатор – АКБ заряджено; 11. На задній панелі вимірювального блоку – 4 роз'єми для під'єднання сенсорів; 12. Тип роз'ємів для під'єднання сенсорів до вимірювального блоку – push-pull LEMOlike 4 pin connectors (наприклад YC8-4P або Mini XLR). 13. Корпус вимірювального блоку має бути міцним та

витримувати падіння з рівня офісного столу; 14. Зовнішні умови експлуатації пристрою: температура від 20°С до 45°С; вологість від 40% до 80%.

На екрані мають відображатися результати вимірювань температури, тиску та залежності зміни провідності тканини (рис. 1). На рис. 2 наведено зразок виконання сенсора.



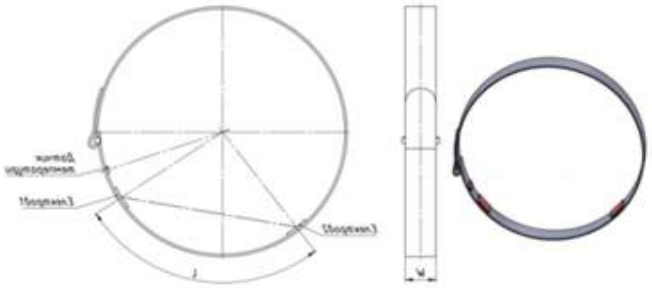


Рисунок 1 – Відображення даних вимірювань Рисунок 2 – Зразок розташування сенсорів

Рисунок 3 – Результати обстеження

Вимірювання завершується автоматично після закінчення заданого часу, або його зупиняє користувач командою «Стоп». Якщо результат вимірювання задовольняє користувача, він повинен зберегти результати вимірювань в архіві пристрою натискаючи кнопку «Зберегти». Якщо пацієнта з таким прізвищем ще немає в базі даних пристрою, його ім'я заноситься до бази даних.

Якщо потрібно повторити обстеження (на рис. 3 наведено результати обстеження), не змінюючи ім'я пацієнта та налаштування пристрою, потрібно натиснути кнопку «Повторити» і пристрій переходить до початку обстеження.

Висновок. Використання імпедансного контролю дозволяє прогнозувати розвиток реперфузійного синдрому та зменшити ризик ускладнень після зняття кровоспинного джгута. Розроблений новий спосіб швидкого тест-діагностування розвитку ішемії дозволяє проводити діагностику за 1,5–2 хвилини. Сформульовані медичні та технічні вимоги до пристрою для контролю зміни властивості тканини кінцівки під час поранення та накладання кровоспинного джгута-турнікета, а розроблене технічне завдання дозволить виготовити такий портативний пристрій, який фіксується поруч з джгутом-турнікетом та вказує залишковий час до настання критичного стану біологічної тканини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Самарський І. М., Хорошун Е. М. Надання першої медичної допомоги при пораненнях великих судин кінцівок в умовам бойових дій, турнікетний синдром та його профілатика. Український журнал військової медицини 2. 2, Т,4023.

2. Holcomb JB, Dorlac WC, Drew BG, Butler FK, Gurney JM. Rethinking limb tourniquet conversion in the prehospital environment. J Trauma Acute Care Surg. 2023 Dec 1;95(6):e54-e60.

3. Kryvonosov V.; Avrunin O.; Sander S.; Pavlov V.; Martyniuk L.; Zhumazhanov B. A Usage of the Impedance Method for Detecting Circulatory Disorders to Determine the Degree of Limb Ischemia. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 2023-12-20. DOI: 10.35784

4. Kryvonosov, V., Prudnikova, N., Martyniuk, L. Justification of the electrical scheme of biological tissue replacement under the action of DC voltage. Machinery & Energetics, 13(4), 60-71. 2022.

5. Патент на корисну модель України № 153912. Автори: Кривоносов В. Є., Павлов В. С., Мартинюк Л. В. Пристрій для комплексного дослідження електропровідності біологічної тканини постійним струмом».

УДК 615.47

ОЦІНКА ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ТОЧНІСТЬ НАВІГАЦІЇ ПРИ СТЕРЕОТАКСИЧНІЙ РАДІОТЕРАПІЇ

Мельник В. В., асп., e-mail: valentyn.melnyk@nure.ua
Лебединський О. Е., студ., e-mail: oleksandr.lebedynskyi@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Стереотаксичне наведення застосовується при високоточній променевій терапії, яка використовується для лікування пухлин та деяких інших патологічних станів [1, 2]. Стереотаксчний підхід дозволяє за точною тривимірною (3D) навігацією визначати положення патологічної ділянки (наприклад, пухлини) всередині організму. Для цього використовується спеціальна система координат, що допомагає з високою точністю (до часток міліметра) навести лікувальне або діагностичне обладнання на потрібну ділянку [3, 4]. Традиційно метод застосовувався в нейрохірургії для проведення біопсій, глибинної електростимуляції головного мозку, кріодеструкції патологічних структур та інших дій [5, 6]. Стереотаксична радіотерапія – це високоточна форма променевої терапії, при якій на невелику цільову ділянку подається висока доза випромінювання з кількох напрямків з метою максимального руйнування пухлини при мінімальному впливі на навколишні здорові тканини. Основними типами стереотаксичної радіотерапії є стереотаксична радіохірургія – зазвичай одноразове опромінення (наприклад, для знищення пухлин мозку). Стереотаксична променева терапія передбачає проведення декілька таких сеансів. Для планування радіотерапії та наведення пучків випромінювання використовуються системи візуалізації різні типи комп'ютерної реконструктивної томографії для визначення точної локалізації патологічного процесу [7, 8]. Випромінювання подається з багатьох напрямків, наприклад з засобів, таких як лінійний прискорювач, Gamma Knife, CyberKnife. Планування проводиться з використанням обчислювальних технологій з урахуванням рухів органів (дихання тощо) з високою точністю близько 1 мм. Актуальною проблемою при цьому є розробка підходів для зниження інвазивності дії іонізуючого випромінювання на оточуючі тканини.

Мета дослідження – провести оцінку основних факторів впливу на точність навігації при стереотаксичній радіотерапії.

Основні матеріали досліджень. Наведення при радіотерапії – це процес точного спрямування і фокусування пучка іонізуючого випромінювання на пухлину з метою максимального ураження злоякісних клітин при мінімальному пошкодженні здорових тканин. Це один із ключових етапів планування та проведення променевої терапії. Основними етапами наведення при цьому є іммобілізація пацієнта – фіксування у стабільному положенні (за допомогою масок, матраців, щелепних пластин, підголівників тощо). Це запобігає рухам, які можуть знизити точність опромінення – зведення променів в заданій точці [9, 10]. Процес радіотерапії розподіляється на декілька етапів. Спочатку виконується КТ-симуляція – імітація сеансу опромінювання за допомогою мультимодальної комп'ютерної томографії. Отримані зображення використовуються для визначення точної локалізації пухлини та критичних органів. Далі виконується планування лікування, на стадії якого лікар-радіолог разом із медичним фізиком створює індивідуальний план опромінення у спеціалізованій комп'ютерній системі. Розраховується доза, напрямки пучків та кути опромінення. Перед кожним сеансом проводиться верифікаційна зйомка для наведення за допомогою засобів томографії, рентгенографії, або оптичного трекінгу. Положення пацієнта або стіл коригуються відповідно до плану наведення. Це забезпечує субміліметрову точність наведення. При наведенні система відстежує поверхню тіла пацієнта в реальному часі. Також використовуються додаткові маркери – маленькі металеві мітки, які імплантуються біля області розташування пухлини для точнішого наведення, для автоматичного відстеження руху пухлини, наприклад, під час дихання. Метою наведення є забезпечення максимальної

точності доставки дози до цільового об’єму, зменшення опромінення навколишніх здорових тканин та, відповідно, підвищити ефективність лікування, зменшити побічні ефекти та ризик ускладнень.

Висновок. На точність доставки дози іонізуючого випромінювання до цільового об’єму впливають такі фактори, як визначення точної локалізації пухлини та критичних органів при симуляції, помилки індивідуального планування при роботі з даними щодо визначення дози, напрямків пучків та кутів опромінення, а також похибки трекінгової системи. На загальну точність впливають точність механічних частин пристроїв променевої терапії а також систем візуалізації. Подальші дослідження спрямовані на аналіз похибок стереотаксичного наведення при плануванні радіотерапії в конкретизованих медичних системах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tymkovych, M. Y., Avrunin, O. G. Farouk, H. I. Reconstruction method of the intact surface of surgical accesses. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2014, 9(70), 37-41.

2. O. Avrunin, M. Tymkovych, V. Semenets, & V. Piatykop. (2019). Computed tomography dataset analysis for stereotaxic neurosurgery navigation. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL, 2019-September 606-609. doi:10.1109/CAOL46282.2019.9019459

3. Tymkovych M.Y. Classification of CT-brain slices based on local histograms / O.G. Avrunin, M.Y. Tymkovych, S.V. Pavlov, S.V. Timchik, P. Kisala, Y. Orakbaev // Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications. – 2015. – P. 161 – 168. 4. Tymkovych M. Capabilites to vizualize the operating region of surgical intervention relatively to cranial landmarks for neuronavigation / O.G. Avrunin, M. Tymkovych, T. Kononenko // Estonia, Tallin, Eureka: Physics and Engineering. – 2016. – Volume 1(2). – P. 21 – 30.

4. O. G. Avrunin, M. Alkhorayef, H. F. I Saied, & M. Y. Tymkovych, (2015). The surgical navigation system with optical position determination technology and sources of errors. Journal of Medical Imaging and Health Informatics, 5(4), 689-696. doi:10.1166/jmihi.2015.1444 10. O. G. Avrunin, M.Y. Tymkovych, S.P. Moskovko, etc.. (2017). Using a priori data for segmentation anatomical structures of the brain. PrzegladElektrotechniczny, 93(5), 102-105. doi:10.15199/48.2017.05.20

5. П'ятикоп, В. О. Сучасні технології фантомного моделювання в нейрохірургії як різновид симуляційного навчання лікарів-нейрохірургів / В.О. П'ятикоп, О.Г. Аврунін, М.Ю. Тимкович, І.О. Кутовий, І.О. Полях // Матеріали навчально-методичної конференції Симуляційне навчання в системі підготовки медичних кадрів, Харків, ХНМУ.– 2016.– С.136-138.

6. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С.В. Павлов, О.Г. Аврунін, С.М. Злепко, Є.В. Бодянський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. 260 с.

7. Avrunin OG Visualization of the ventrolateral nucleus of the thalamus of the human brain / O.G. Avrunin, V.V. Semenets, S.Yu. Maslovsky // Radioelectronics and Informatics. 1998.– P. 132-134.

8. Аврунин О. Г. Визуализация данных контрастной компьютерной томографии / О. Г. Аврунин, Т. А. Карпенко // Прикладная радиоэлектроника. – 2007. – № 1. – С. 56-61.

9. Аврунин О. Г. Методы визуализации внутримозговых структур на современном этапе / О. Г. Аврунин, В. В. Семенец, А. Б. Щербакова. Радиоэлектроника и информатика. 1999. № 4(9) С. 107-108.

10. Місоченко С. Ю. Дослідження використання вірогіднісних методів у сфері обробки біомедичних зображень / С. Ю.Місоченко, К. Г. Селіванова, О. Г. Аврунін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD2022, 19-21 жовтня 2022 р. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – С. 902.

УДК 615.8

МОЖЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ТЕРАПІЇ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ ТРИВОГИ, ПАНІКИ Й ПОСТТРАВМАТИЧНИХ СТРЕСОВИХ РОЗЛАДІВ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Михайлов Б. В., викл., e-mail: mixailov.com@gmail.com
Харківський фаховий коледж харчової промисловості
Пісня Л. А., к.т.н., e-mail: leonid_pisnya@ukr.net
Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»
Півень Д. А., здобувач вищої освіти, e-mail: lji94661@gmail.com
Черепньов І. А., к.т.н., доц., e-mail: i.cherepnev@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я понад 1 мільярд людей живуть з порушеннями психічного здоров'я – тривожними розладами, депресією та іншими психічними дисфункціями, що завдають колосальної шкоди людям та економіці. Самогубства залишаються одним з найтрагічніших наслідків психічних розладів і тільки в 2021 р забрали життя 727 000 чоловік [1]. В умовах надзвичайної ситуації, в тому числі і військового походження, тиск на психіку різко посилюється. Наприклад, в період Першої світової війни, серед жителів Лондона після початку повітряних бомбардувань серед порушень здоров'я все частіше стали діагностувати тривожні розлади та розлади настрою [2]. З розвитком військової промисловості та змінами у військових стратегіях та ідеології протягом останніх десятиліть поля битв перейшли на місця проживання та роботи цивільних осіб, що робить їх більш вразливими та залученими до бойових дій [3]. Відповідно зростає і тиск на психіку та досить часто виникає ефект посттравматичного стресового розладу (ПТСР). У порівнянні з цивільними особами, у військовослужбовців загальна поширеність ПТСР вище: до 30% ветеранів страждають від цієї хвороби, а у 15% симптоми продовжують проявлятися через 10 років після закінчення війни [4]. Як зазначено в [4,5] медикаментозне лікування цих розладів психіки досить витратне (в окремих випадках 20 000 доларів США на одну людину) має широкий спектр протипоказань і негативних наслідків) та ін. Психотерапія також ефективна для більшості пацієнтів з тривожними розладами, але проблеми з доступністю, вартістю та обов'язковістю лікування обмежують її застосування. Більш того, значна частина пацієнтів практично не реагує на цю форму лікування. Крім того, серед тих, хто досягає ремісії, висока частота рецидивів [6].

Мета дослідження – розглянути варіанти використання безмедикаментозних методів лікування, заснованих на електромагнітної терапії.

Основні матеріали досліджень. У [4] запропоновано використовувати транскраніальну магнітну стимуляцію. Цей метод, передбачає стимуляцію певних ділянок мозку за допомогою електромагнітної індукції. В даний час він застосовується при лікуванні важкого депресивного розладу. Проведені дослідження показали, що високочастотна стимуляція більш ефективна, ніж низькочастотна. У списку зареєстрованих побічних ефектів на першому місці по частоті прояви вказані головні болі, які усуваються за допомогою препаратів відносяться до класу слабких знеболюючих. У поодиноких випадках відзначено появу судом у пацієнтів мають відповідну схильність організму. Однак, за даними [4] необхідно накопичення більшого банку даних для застосування цього методу для лікування ПТСР. В [5] запропоновано застосовувати для лікування імпульсне магнітне поле. Наведено дані експериментів над лабораторними тваринами та досліджень за участю людини. В експерименті на мишах, що відчувають тривогу, було використано імпульсне низькочастотне магнітне поле. У мишей спостерігалося зниження «тривожної» поведінки, яке спостерігалося протягом перших 10–15 хвилин впливу. Порівняно з відносно низькою дозою класичного препарату проти тривоги, бензодіазепіну, магнітне поле також покращило поведінку. Високочастотна терапія 20 Гц в якості додаткового антидепресивного засобу

використовувалася у пацієнтів зі стійкою до медикаментозного лікування депресією і тривожністю. Були отримані позитивні результати [5]. В [6] наведені результати відносного нового методу лікування ПТСР шляхом нейростимуляції шляхом імплантації платино-іридієвих електродів діаметром приблизно 1,3 мм з двох сторін в область головного мозку. Численні стимулюючі контакти на кінчику електрода дозволяють точно впливати на ділянки в цільовій структурі мозку. Провід з'єднують стимулюючі електроди з генератором імпульсів, імплантованим підшкірно під ключицею, а портативний бездротовий програматор дозволяє постійно неінвазивно регулювати параметри стимулу. Однак, як зазначено в вищецитованій роботі, отриманий терапевтичний ефект знаходиться в стадії аналізу і поглибленого вивчення. Існують дані про результат застосування електросудомної терапії ПТСР. Зокрема в [7] відзначено, що електрошокова терапія в поєднанні з відновленням пам'яті після травм до початку лікування була не більш ефективна для лікування симптомів ПТСР, ніж електрошокова терапія з відновленням пам'яті без травм. Однак в [6] стверджується, що наявні результати в даний час поки не дозволяють на постійній основі застосовувати даний метод для лікування ПТСР.

Висновок. З огляду на вищесказане, для розширеного застосування всього спектру методів електромагнітної терапії ПТСР вимагає проведення подальших досліджень. Але є одне загальне обмеження: в процесі лікування необхідно враховувати постійну негативну дію на пацієнтів техногенних електромагнітних полів від ліній електропередач та ін. джерел випромінювання [5].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Over a billion people living with mental health conditions – services require urgent scale-up. World Health Organization.: веб-сайт. URL: https://www.who.int/news/item/02-09-2025-over-a-billion-people-living-with-mental-health-conditions-services-require-urgent-scale-up (дата звернення: 28.10. 2025).

2. Linden S. When war came home: air-raid shock in World War I. *History of Psychiatry.* 2021, Vol. 3, № 3. P. 289 –307. doi.org/10.1177/0957154X2199821.

3. Khorram -Manesh A., Burkle F., Goniewicz K., Robinson Y. Estimating the Number of Civilian Casualties in Modern Armed Conflicts–A Systematic Review. *Frontiers in Public Health.* 2021. Vol. 9. Article 765261. doi:10.3389/fpubh.2021.765261.

4. Edinoff A., Hegefeld T., Petersen M. and all. Transcranial magnetic stimulation for post-traumatic stress disorder. *Therapeutic Advances in Psychopharmacology.* 2021. Vol. 13. 701348. doi:10.1177/20451253211049921.

5. Pawluk W. Pulsed Magnetic Field Treatment of Anxiety, Panic and Post-Traumatic Stress Disorders. *Journal of Alternative Complementary & Integrative Medicine*. 2019. №5. 075 doi: 10.24966/acim-7562/100075.

6. Freire R., Cabrera-Abreu C., Milev R. Neurostimulation in Anxiety Disorders, Post-traumatic Stress Disorder, and Obsessive-Compulsive Disorder. *Advances in Experimental Medicine and Biology*: collective monograph / ed. By A. Disorders. Singapore: Springer, 2020. P. 331-346. doi:10.1007/978-981-32-9705-0_18.

7. Tang V, Trought K., Gica K. and all. Electroconvulsive therapy with a memory reactivation intervention for post-traumatic stress disorder: A randomized controlled trial. *Brain Stimulation.* 2021. № 14. P. 635-642. doi:10.1101/2020.10.10.20210450.

УДК 621.3.049.77:621.317.39

ПЕРСПЕКТИВНІ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ У ПРОМИСЛОВОСТІ

Окушко О. В., к.т.н., доц., e-mail: okushko@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України
Ковтун П. М., викл., oleg.kovtun447@gmail.com
ВСП НУБіП України «Немішаєвський агротехнічний коледж»

Актуальність дослідження. Сучасна промисловість, що охоплює машинобудівні, енергетичні, авіаційні, транспортні та агропереробні підприємства, базується на широкому використанні електротехнічного обладнання. Надійність цього обладнання визначає ефективність виробництва, безпеку персоналу та стабільність технологічних процесів. Проте вітчизняна ремонтна база в багатьох секторах промисловості продовжує використовувати застарілі технології, які характеризуються високими енерговитратами, низькою продуктивністю та недостатньою якістю відновлення вузлів і деталей.

В умовах глобальної конкуренції підприємства вимушені знижувати витрати та підвищувати якість технічного обслуговування. У розвинених країнах (Німеччина, США, Японія, Південна Корея) ремонт електротехнічних систем уже давно здійснюється із застосуванням високоефективних електротехнологічних методів – ультразвукової обробки, плазмового напилення, електроіскрового легування, електростатичного нанесення покриттів, електромагнітного просочення тощо. Вони забезпечують енергозбереження, мінімізацію втрат матеріалів та екологічну безпечність виробництва

В Україні потенціал цих технологій використовується лише частково. Частка їх впровадження у промислових ремонтних процесах не перевищує 30 %, тоді як у країнах ЄС це понад 80 %, що пов’язано із браком сучасного обладнання, низькою обізнаністю спеціалістів, обмеженими фінансовими ресурсами та недостатнім рівнем автоматизації ремонтних майстерень.

Таким чином, актуальність дослідження полягає у необхідності пошуку, адаптації та впровадження перспективних методів ремонту та виготовлення електротехнічного обладнання, які забезпечать зниження енерговитрат, підвищення якості і надійності, а також інтеграцію українських підприємств у європейський промисловий простір.

Мета дослідження полягає у розробленні та вдосконаленні електротехнологічних методів відновлення та виготовлення електротехнічного обладнання, орієнтованих на промислове застосування, зокрема: впровадження ультразвукових, електромагнітних, плазмових та електростатичних методів ремонту, підвищення енергоефективності виробничих процесів, забезпечення екологічної безпеки шляхом скорочення використання токсичних розчинників та підвищення якості ізоляційних матеріалів та захисних покриттів.

Основні матеріали досліджень. У промисловому секторі (енергетика, транспорт, приладобудування) традиційні методи очищення деталей часто потребують великих трудових затрат і не гарантують повного видалення нагару, мастил чи корозії. Так, наприклад, ультразвукова очистка із частотами 22 – 60 кГц дозволяє інтенсифікувати процес у 5 – 10 разів, зменшити споживання миючих засобів на 50 %, а також забезпечити високу якість обробки складних поверхонь (ротори, ізолятори, електродвигуни, трансформатори). Такі установки (на базі п’єзоелектричних перетворювачів) успішно використовуються на підприємствах Siemens, ABB, Schneider Electric, де застосовується автоматичний контроль чистоти поверхонь після обробки за допомогою акустичних сенсорів.

Вітчизняні приклади: установка УЗП-500 (0,5–1,5 кВт) дозволяє очищати як дрібні деталі (до 1 кг), так і вузли масою до 100 кг у робочих ваннах об’ємом до 500 літрів.

Операції просочення ізоляцій у промисловості мають вирішальне значення для довговічності електричних машин. Традиційні способи (занурення, обливання, вакуумування) не завжди забезпечують рівномірність проникнення ізоляційних лаків. Так,

наприклад. просочення ультразвуком (18–24 кГц) підвищує глибину проникнення лаку до 30–60 мм (проти 3–5 мм при традиційних методах), зменшує час процесу у 10 разів, енерговитрати – до 60 %. Така технологія використовується у виробництві електродвигунів, трансформаторів, генераторів, а також у ремонті комутаційного обладнання, де важлива стійкість до вологи та температури.

Окремої уваги заслуговують плазмові технології відновлення контактних поверхонь, які забезпечують нанесення металевих і керамічних покриттів товщиною до 1 мм із високою адгезією. Такі методи застосовуються у відновленні колекторів, роторів, підшипникових гнізд, а також у ремонті електродів.

Електроіскрове легування дозволяє зміцнювати робочі поверхні електроконтактів, підвищуючи їх зносостійкість у 2–3 рази. Наприклад, підприємства Rolls-Royce, Bosch, Electroimpact активно використовують ці технології у відновленні елементів електромеханічних систем. В Україні плазмове напилення застосовується на підприємствах «Турбоатом», «Електроважмаш», «ДТЕК Енерго».

Висновок. Використання сучасних електротехнологій у промисловому виробництві та ремонті електротехнічного обладнання дозволяє зменшити енерговитрати на 30–40 %, скоротити матеріальні витрати на 50–60 %, підвищити продуктивність праці у 2–3 рази, забезпечити високу якість і надійність ремонтованого обладнання та покращити екологічну безпеку виробництва.

Застосування ультразвукових, електромагнітних, плазмових та електростатичних методів є ключовим напрямом модернізації ремонтних процесів на підприємствах промисловості. Вони не лише покращують технічні характеристики обладнання, але й відповідають концепції сталого розвитку, сприяючи зниженню енергоємності та шкідливих викидів у навколишнє середовище.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Іноземцев Г. Б., Берека О. М., Окушко О. В. Електротехнології обробки сільськогосподарської продукції: монографія. – К.: АграрМедіаГруп, 2013. – 293 с.

2. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В. Перспективні методи виготовлення та ремонту електротехнічного обладнання в умовах АПК.

3. Siemens AG. Industrial Ultrasonic Cleaning Systems – Technical Overview, 2022.

4. Dow Corning Corporation. High-Performance Silicone Materials for Electrical Insulation, 2021.

5. Wagner Group. Powder Coating Technologies in Heavy Industry, 2020.

6. General Electric. Electromagnetic Impregnation Systems for High-Voltage Components, 2023.

УДК 004.45:615.851

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПЕРВИННОЇ ПСИХОЛОГІЧНОЇ ДОПОМОГИ ТА РЕАБІЛІТАЦІЇ

Пономаренко В. А., асп., e-mail: volodymyr.ponomarenko1@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Сучасний світ зазнає постійних трансформацій, які ставлять перед людством нові випробування. Одними з найгостріших серед них є виклики ментальному здоров'ю, що можуть з часом можуть перетворюватись на серйозну суспільну проблему. За останні 5 років українське суспільство зіткнулось з низкою масштабних подій. Спочатку – пандемія COVID-19, згодом – повномасштабне вторгнення Російської Федерації у 2022 році. За даними ВОЗ на 2024 рік в Україні перебуває до 9,6 мільйона людей, що зазнали психологічних розладів, з яких 3,9 мільйона мають помірні або тяжкі симптоми [1]. Очевидно, що в результаті продовження бойових дій, у 2025 році ці показники будуть збільшуватись. Ситуація ускладнюється тим, що вплив пандемії та війни накладається, створюючи кумулятивний психотравмувальний ефект, який потребує реакції від системи охорони здоров'я України та розвитку систем психологічної допомоги та реабілітації [2].

Мета дослідження. Аналіз методів та засобів психологічної допомоги та реабілітації із застосуванням вебсервісів та мобільних застосунків, що спрямовані на відновлення та полегшення психоемоційного стану населення України в умовах наслідків пандемії COVID-19 та воєнних дій. Можливості та досвід застосування сучасних цифрових інструментів, визначення ефективних підходів до дистанційної підтримки, а також створення технологічної моделі, здатної забезпечити доступну, адаптивну та персоналізовану психологічну допомогу.

Основні матеріали досліджень. На сьогоднішній день вже існує певна кількість вебсервісів і мобільних застосунків, спрямованих на оцінку психоемоційного стану користувачів та надання рекомендацій або вправ для первинної психологічної підтримки.

MARTA (Mental Adaptation and Rehabilitation Tools and Analysis) – це інтернет-ресурс, який пропонує спеціальні тести для діагностики поточного стану, моніторинг та подальшу психоемоційну підтримку [3]. Ключова мета – забезпечити доступний інструмент для швидкої оцінки психологічного стану та формування персоналізованих рекомендацій для подальших дій самопідтримки, спеціалізованих вправ або контакти для роботи зі спеціалістом. Запропоновані за участі експертів НАТО та ВООЗ тести, дозволяють робити діагностику за категоріями – посттравматичний стрес, стресостійкість, тривожність, депресивність, алкогольну залежність та проблеми зі сном.

Вебсервіс «Ти як?» створений в межах всеукраїнської програми ментального здоров'я за сприянням міжнародних та державних організацій та підтримки Першої леді України Олени Зеленської [4]. Основна метапроекту це забезпечення доступу до інструментів психологічної самодопомоги та інформаційної консультації. Платформа містить матеріали з техніками саморегуляції, дихальними вправами, порадами для зниження стресу та тестом для первинної оцінки психоемоційного стану користувача. На основі результатів тесту користувач отримує рекомендації щодо подальших дій або вправ для самодопомоги.

Мобільний додаток «База» створений для надання первинної психологічної підтримки та оперативного зниження рівня стресу в умовах тривалого психоемоційного навантаження [5]. Додаток поєднує методики самодопомоги, дихальні вправи, короткі психоосвітні матеріали для особистого ознайомлення та інструменти для відстеження власного емоційного стану. Орієнтований на цивільне населення та військових, забезпечує простий доступ до рекомендацій психологів і сприяє формуванню навичок саморегуляції. Інтерактивна структура і формат мобільного додатку є ефективним інструментом первинної психологічної допомоги та реабілітації у підручному цифровому середовищі.

Мобільний додаток «PTSD Coach» розроблений фахівцями Департаменту у справах ветеранів США та Міністерства оборони США для надання підтримки людям, які пережили травматичні події [6]. Додаток містить інструменти для самодіагностики симптомів

посттравматичного стресового розладу (ПТСР), освітні матеріали про природу стресових реакцій та вправи для зниження тривожності, контролю дихання й покращення сну. Також реалізовано можливість самостійної оцінки поточного психологічного стану користувача, на основі якої пропонуються індивідуально підібрані вправи для самостійного виконання,можливість вести щоденник настрою та відстежувати динаміку стану. Поєднання науково обґрунтованих методик когнітивно-поведінкової терапії та зручний інтерфейс є ефективним інструментом цифрової психологічної самодопомоги та реабілітації, однак наразі додаток не має україномовної адаптації, що ускладнює його використання серед українських користувачів.

Мобільний застосунок «Wysa» поєднує чат-бот на базі штучного інтелекту та можливість звернення до кваліфікованих фахівців, призначений для підтримки психічного здоров'я [7]. Функції включають 24/7-доступ до «розмовного» інтерфейсу, бібліотеку самодопомоги (дихальні вправи, майндфулнес, техніки когнітивно-поведінкової терапії), індивідуальний план дій та інтегровану систему реагування у кризових ситуаціях. Сервіс відповідає високим стандартам безпеки даних, має позитивні оцінки за доступністю, надійністю та доказовою базою – за моделлю оцінки American Psychiatric Association отримав один із найвищих балів.

Висновок. Аналіз сучасних вебсервісів і мобільних застосунків для психологічної підтримки демонструє суттєвий прогрес у напрямі цифрової психореабілітації. Ці рішення забезпечують доступ до самодіагностики, рекомендацій і психоосвітніх матеріалів, що дозволяє своєчасно ідентифікувати свій психоемоційний стан та отримати базову допомогу без залучення фахівця. Проте, залишаються низка проблемних аспектів, що стримують ефективність таких інструментів. По-перше, це психологічний бар'єр – не всі користувачі готові звернутись до анонімного сервісу через певні особисті переконання, недовіру до автоматизованих систем чи інших факторів. По-друге, складність інтерфейсу та перевантаженість функціями ускладнюють взаємодію та пошук необхідного функціоналу [8]. Більшість проаналізованих сервісів мають низький рівень персоналізації, оскільки рекомендації та вправи формуються за узагальненими алгоритмами без урахування індивідуальних особливостей користувача, Додатковим обмеженням є відсутність у україномовної адаптації у більшості популярних міжнародних платформ. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення доступних, локалізованих і психологічно чутливих цифрових рішень, які зможуть ефективно та оперативно підтримувати користувачів у кризових ситуаціях і зменшувати бар'єри до початку професійної терапії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1.World Health Organization's response to health emergencies in Ukraine:annual report 2024. URL: https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2025-12500-52274-80390

2. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С.В. Павлов, О.Г. Аврунін, С.М. Злепко, Є.В. Бодянський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. 260 с.

3. Міністерство у справах ветеранів. MARTA – психологічна підтримка тут і зараз. URL: https://marta.mva.gov.ua

4. Ти як? Всеукраїнська програма ментального здоров'я. URL:https://howareu.com/

5. База – психологічна підтримка.URL: https://apps.apple.com/ua/app/база-психологічна-підтримка/id6449841911

6.U.S. DepartmentofVeteransAffairs. PTSD: NationalCenterfor PTSD. URL: https://www.ptsd.va.gov/appvid/mobile/

7.Wysa. Mental health. URL :https://www.wysa.com/

8. Чумак, В. С., Аврунін, О. Г., Чугуй, Є. А., & Свид, І. В. (2021). Аналіз принципів побудови телемедичних комплексів широкого призначення. АСУ та прилади автоматики, 177, 80–85.

УДК 621.313.8: 631.53.027

ОБРОБКА ПОЛИВНОЇ ВОДИ В ПОЛІ КОРОННОГО РОЗРЯДУ

Савченко В. В., к.т.н., доц., e-mail: vit1986@ua.fm
Синявський О. Ю., к.т.н., доц., e-mail: sinyavsky2008@ukr.net
Шевченко О. О., студент магістратури
Федик О. В., студент магістратури
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Актуальність дослідження. Підвищення ефективності тепличного овочівництва пов'язане з переходом до енерго- та ресурсозберігаючих технологій вирощування рослин при використанні малооб'ємних субстратів або на штучно створеному середовищі живлення без субстрату, а також застосуванні електротехнологій.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що поливання рослин активованою водою, обробленою в магнітному полі, електричним струмом, заморожуванням і розморожуванням дає певний ефект, пов'язаний із збільшенням урожайності [1]. При цьому покращується використання мінеральних добрив. Але відсутні рекомендації щодо оптимальних режимів обробки водних розчинів в електричному полі, не досліджувався вплив електричної обробки на зміну їх параметрів, що стримує розробку відповідного обладнання і застосування цих методів у тепличному овочівництві. Тому важливим завданням є встановлення механізму дії поля коронного розряду на водні розчини з метою визначення діючих факторів та їх оптимальних значень.

Мета дослідження – встановлення впливу поля коронного розряду на параметри поливної води.

Основні матеріали досліджень. Експериментальні дослідження із впливу поля коронного розряду на поливну воду проводили на експериментальній установці.

Для отримання оптимальних режимів роботи установок для обробки поливної води та розчинів мінеральних добрив в полі коронного розряду необхідна напруга 20–50 кВ при струмі не більше 10 мА. Виходячи з цих умов, створено лабораторну установку, яка складається з автотрансформатора, блока підвищувального трансформатора, двопівперіодної схеми множення напруги, кіловольтметра електростатичної системи, осцилографа з під'єднаною рамковою антеною, тримача коронуючих електродів та некоронуючого електрода.

Двопівперіодна схема множення напруги порівняно з однопівперіодними забезпечує менший спад напруги в схемі та меншу пульсацію напруги навантаження, дозволяє отримати більш високу вихідну напругу та більше значення струму навантаження.

Момент початку коронування електродів, які виготовленні з тонкого неізольованого проводу і встановлені на ізоляторах, при плавному підвищенні напруги живлення автотрансформатором визначається за допомогою електронного осцилографа, до входу якого під'єднується рамкова антена, розміщена біля розрядного проміжку. Початок коронування електродів супроводжується появою на екрані осцилографа високочастотного сигналу. Напруга початку коронування визначалася за допомогою кіловольтметра електростатичної системи.

Визначені зміни pH та окислювально-відновного потенціалу (ОВП) води при її обробці в полі коронного розряду протягом 1, 2 і 3 хвилин (відстань між коронуючим електродом і площиною 3 см), які показали, що збільшення напруги і часу обробки призводить до зростання pH води, а ОВП при цьому зменшується. Збільшення відстані між коронуючим електродом і площиною призводить до зменшення ефекту електричної обробки води при незмінній напрузі, тобто збільшення відстані між коронуючим електродом і площиною вимагає підвищення напруги, щоб отримати такі ж зміни pH та ОВП, як і при менших відстанях між електродом і площиною.

Досліди проводили як при електропровідному дні жолоба, в якому оброблялася вода, так і неелектропровідному. При цьому різниці у зміні pH та ОВП не зафіксовано. Це підтверджує те, що причиною зміни параметрів розчину є потік аероіонів, які рухаючись за силовими лініями електричного поля, дифундують у водний розчин. Зміна товщини шару розчину також не суттєво впливає на ефект обробки, оскільки він залежить згідно з теоретичними дослідженнями лише від товщини дифузійного шару.

Проведені дослідження зміни ефекту обробки поливної води в полі коронного розряду в часі.

Зміна pH обробленої води в полі коронного розряду зростає до певної величини, після чого зменшується, наближуючись до pH необробленої. Оскільки pH обробленої води зростає швидше порівняно з необробленою, то це свідчить, що обробка води в полі коронного розряду прискорює хімічні реакції.

Дослідження впливу обробки поливної води в полі коронного розряду на ріст і розвиток рослин проводилися у відповідності із методикою польового досліду [2].

Досліди проводилися з огірками гібриду "Топольок". При цьому вони проводилися за такою схемою:

1-й варіант (контрольний) – рослини поливають водопровідною водою;

2-й варіант – рослини поливають водою, обробленою в полі коронного розряду.

Поливну воду оброблювали в полі коронного розряду при напрузі на коронуючому електроді 15,5 кВ, відстані між ним і площиною 3 см, між коронуючими електродами – 5 см, часі обробки 1 хв.

Досліди проводилися в ґрунтовій теплиці, обладнаній краплинною системою поливання. Дослідні ділянки, площею 8 м^2, розміщували методом звичайних повторень. Досліди проводилися в чотирикратній повторності.

У результаті проведених досліджень встановлено, що обробка поливної води в полі коронного розряду позитивно впливає на ріст і розвиток рослин. При поливанні огірків водою, обробленою в полі коронного розряду, прискорюється їх ріст, причому перевищення в рості стає більш помітним та статистично значущим в період появи третього листка, початку цвітіння і плодоношення та складає відповідно 10,25, 15 і 17 см.

При обробці поливної води в полі коронного розряду спостерігалося більш раннє цвітіння та плодоношення (на 2-3 дні).

Маса рослин при обробці поливної води в полі коронного розряду також була більшою На початку періоду плодоношення вона була на 9,1 г більшою при $НСР_{05}$ рівній 0,91 г.

При обробці поливної води в полі коронного розряду підвищується урожайність овочевих культур. Урожайність огірків при існуючій технології вирощування склала 26,8 кг/м^2, а при обробці поливної води в полі коронного розряду – 30,7 кг/м^2, тобто урожайність підвищилася на 14,7 %.

Висновок. На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що оптимальним режимом обробки поливної води в полі коронного розряду є напруга 15,5 кВ при відстані між коронуючим електродом і площиною 3 см. Відстань між електродами згідно з дослідженнями Г. М. Борща повинна становити 5 см. Час обробки води – 1 хв, оскільки при більших експозиціях ефект обробки змінюється несуттєво.

За такого режиму обробки поливної води врожайність огірків підвищилася на 14,7 %.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ковалевський, С. В.; Сокур, С. В. Застосування коронного розряду у технологіях. *Вісник ЖДТУ*. 2011. № 3 (58). С. 56–58.

2. Рожков А. О., Пузік В. К., Каленська С. М., Пузік Л. М., Попов С. І., Музафаров Н. М., Бухало В. Я., Криштоп Є. А. Дослідна справа в агрономії: навч. посібник: у 2 кн. Кн. 1. Теоретичні аспекти дослідної справи; за ред. А. О. Рожкова. Х.: Майдан, 2016. 316 с.

УДК 615.47

ІНТЕГРОВАНІ ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В РИНОЛОГІЇ: ВІД ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МЕДИЦИНИ ДО ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Сокольцов А. О., асп., e-mail: andrii.sokoltsov@nure.ua
Аврунін О. Г., д.т.н., проф., e-mail: oleh.avrunin@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Розвиток сучасної біомедичної інженерії призводить до інтеграції цифрових технологій у всі етапи медичної допомоги – від діагностики до реабілітації. Зокрема, у ринології відбувається поступовий перехід від класичних підходів до лікування до моделей, заснованих на обчислювальній медицині, цифрових двійниках та інтелектуальних системах підтримки клінічних рішень [1, 2]. Такий підхід дозволяє відтворювати фізіологічні та анатомічні процеси пацієнта у віртуальному середовищі, що відкриває нові можливості для персоналізованої медицини, точного планування втручань і симуляційного навчання хірургів [3, 4]. Сучасна ринологія характеризується високим рівнем складності анатомічних структур, варіабельністю будови приносових пазух та обмеженим оперативним простором. Тому впровадження методів тривимірного моделювання, цифрових реконструкцій і математичного аналізу стало важливою складовою клінічної практики [5, 6]. Обчислювальна медицина, що ґрунтується на математичному описі біологічних систем, дозволяє аналізувати структуру й функцію органів на багатьох рівнях — від клітинного до системного. У межах цієї парадигми розробляються моделі, здатні відображати взаємодію біомолекулярних мереж, фізіологічних потоків і механічних деформацій тканин, що є надзвичайно актуальним для дослідження патології верхніх дихальних шляхів [7].

Одним із ключових напрямів цифрової трансформації в оториноларингології є створення цифрових двійників — віртуальних аналогів реальних пацієнтів, побудованих на основі клінічних, зображувальних і фізіологічних даних. Цифровий двійник – це не статична 3D-модель, а динамічна система, яка відтворює стан і поведінку біологічного об’єкта в реальному часі завдяки двосторонньому обміну інформацією між фізичним і цифровим середовищем [8]. Такий підхід промислових технологій Industry 4.0 поступово знаходить своє застосування у медицині завдяки розвитку інтернету речей, хмарних обчислень, сенсорних технологій та методів штучного інтелекту. У ринології цифрові двійники дозволяють інтегрувати дані комп’ютерної томографії, магнітно-резонансної томографії, відеоендоскопії та функціональних досліджень у єдину модель, що відображає анатомічні, гемодинамічні та аеродинамічні характеристики конкретного пацієнта. Такі моделі застосовуються для хірургічного планування, прогнозування результатів операцій, симуляцій складних маніпуляцій у віртуальному просторі, для оцінки ефективності фармакологічного лікування. Обчислювальні алгоритми дають змогу аналізувати потоки повітря в носовій порожнині, виявляти ділянки з підвищеним опором чи турбулентністю, що важливо для корекції носового дихання. Водночас моделі тканинної еластичності та кровопостачання дозволяють оцінити післяопераційні зміни й передбачити ризики ускладнень. Поєднання цифрового двійника з методами машинного навчання створює основу для адаптивних систем клінічної підтримки. Завдяки аналізу великих масивів даних моделі можуть удосконалюватися з кожним новим випадком, формуючи елементи самонавчання та персоналізації. Важливу роль відіграє використання IoT-сенсорів, які забезпечують безперервний моніторинг фізіологічних показників у післяопераційний період, дозволяючи коригувати терапію на основі реальних змін стану пацієнта. Такі рішення сприяють переходу від реактивної до проактивної медицини, де втручання ґрунтується на прогнозі, а не на наслідках. Не менш важливою є роль обчислювальної медицини в аналізі біомолекулярних механізмів захворювань риносинусного комплексу. Цифрові двійники стають не лише анатомічною, а й функціональною моделлю пацієнта, здатною відображати як фізичні, так і біохімічні процеси. З інженерної точки зору, створення цифрового двійника у ринології

базується на поєднанні трьох рівнів: рівня даних (отримання та стандартизація КТ, МРТ, риноманометрії та біометричних показників), аналітичного рівня (побудова математичних моделей повітряних потоків, тканинних деформацій, біомеханіки пазух), та інтерактивного рівня (візуалізація через AR/VR-середовище, симуляційні інтерфейси, хірургічна навігація). Така архітектура створює передумови для реалізації повноцінної віртуальної лабораторії, у якій можна проводити експерименти без ризику для пацієнта, оптимізувати техніку втручань та скорочувати час операцій. Особливе значення має впровадження технологій цифрового двійника у систему підготовки лікарів. Використання віртуальних моделей пацієнтів дає змогу відпрацьовувати техніку ендоскопічних втручань у симульованих умовах, отримуючи зворотний зв'язок щодо точності рухів, траєкторії інструментів і ризику пошкодження критичних структур [9]. Це сприяє підвищенню рівня безпеки та якості хірургічного навчання, що є важливою складовою сучасної біомедичної освіти, і створює умови для побудови масштабних клінічних баз, де кожен цифровий двійник стає частиною колективної моделі захворювання, постійно збагаченої новими клінічними спостереженнями. Такий підхід формує нову парадигму у ринології – перехід від описового підходу до кількісного, від емпіричного лікування до персоналізованого прогнозування. Це відкриває шлях до створення інтелектуальних клінічних систем, у яких реальні й віртуальні дані взаємодіють у режимі зворотного зв'язку, забезпечуючи безпечне, точне та ефективне лікування. Цифровий двійник виступає не лише технологічною інновацією, а й фундаментальним інструментом клінічної трансформації, що поєднує науку, інженерію та медицину в єдиний інтегрований простір майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Avrunin, O.; Tymkovych, M.; Saed, H.F.I.; Loburets, A.; Krivoruchko, I.; Smolarz, A.; Kalimoldayeva, S. Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology. In Information Technology in Medical Diagnostics II– Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 1–8.
2. Ismail, Husham Farouk, et al. The role of paranasal sinuses in the aerodynamics of the nasal cavities. International Journal of Life Science and Medical Research 2.3 (2012): 52-55.
3. Сокольцов А. О. Упровадження 3d-друку в медичну практику: стандартизація, оцінка якості та перспективи розвитку в галузі / А. О. Сокольцов // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК : наукові пошуки молоді : матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., 3 квітня 2025 р. – Харків: Держ. біотехнологічний ун-т., 2025. – С. 167.
4. Tymkovych, O. Gryshkov, O. Avrunin, K. Selivanova, Y. Nosova, V. Mutsenko, et al., "Application of SOFA framework for physics-based simulation of deformable human anatomy of nasal cavity", IFMBE Proceedings, vol. 80, pp. 112-120, 2021.
5. Павлов С. В., Аврунін О. Г., Злепко С. М., Бодянський Є. В., Колісник П. Ф., Лисенко О. М., Чайковський І. А., Філатов В. О. (2019). Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К».– 2019. – 260 с.
6. Winslow RL, Trayanova N, Geman D, Miller MI. Computational medicine: translating models to clinical care. *SciTranslMed*. 2012;4(158):158rv11. doi:10.1126/scitranslmed.3003528
7. Selivanova, K. G., Avrunin, O. G., Tymkovych, M. Y., & Manhora, T. V. (2021). 3D Visualization of Human Body Internal Structures Surface During StereoEndoscopic Operations Using Computer Vision Techniques. Przegląd Elektrotechniczny, (9), 30–33.
8. A. Fuller, Z. Fan, C. Dayand C. Barlow, "DigitalTwin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
9. Park M, Oh N, Jung YG. Digital Twinsin Healthcare and Their Applicability in Rhinology: A Narrative Review. *J Rhinol*. 2023;30(2):80-86. doi:10.18787/jr.2023.00018.

УДК 004.932:621.391:614.2

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ НА ОСНОВІ ВІДКРИТИХ БІОМЕДИЧНИХ ДАНИХ

Терехов М. В., асп., e-mail: mykhailo.terekhov@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. У сучасній біомедичній інженерії спостерігається швидке зростання застосування методів штучного інтелекту для прогнозування та раннього виявлення патологічних станів [1, 2]. Класичні статистичні методи часто виявляються недостатньо ефективними для виявлення складних часових та просторових патернів у багатовимірних даних фізіологічних сигналів, таких як електрокардіограми, електроенцефалограми або параметри життєво важливих функцій [3, 4]. Використання глибинного навчання дозволяє автоматично виділяти релевантні ознаки, аналізувати динаміку сигналів у реальному часі та прогнозувати ймовірність розвитку патологій на ранніх стадіях. Інтелектуальні системи, що поєднують глибокі нейронні мережі та методи обробки сигналів, дозволяють автоматизувати аналіз, виділяти релевантні характеристики та забезпечувати персоналізовану оцінку ризику [5, 6].

Метою дослідження є розробка адаптивної аналітичної платформи, здатної інтегрувати багатовимірні біомедичні дані, автоматично виділяти критичні ознаки та прогнозувати ризик розвитку патологій з високою точністю. Для досягнення цієї мети використовувалися гібридні архітектури нейронних мереж, що поєднують згорткові нейронні мережі CNN для аналізу локальних патернів сигналів, рекурентні блоки LSTM та GRU для моделювання часових залежностей та трансформери для інтеграції багатовимірних даних із різних джерел та сенсорів. Моделі навчалися із застосуванням алгоритмів оптимізації Adam та RMSProp, використанням регуляризації через Dropout, Batch Normalization та ранньої зупинки Early Stopping для уникнення перенавчання. Для контролю узагальнювальної здатності системи застосовувалися методи крос-валідації та балансування вибірки, що забезпечували стабільність прогнозів навіть у разі дисбалансу даних між різними категоріями пацієнтів.

Основні матеріали досліджень. Дослідження базується на відкритих біомедичних датасетах, що включають багатовимірні сигнали пацієнтів, електрокардіограми та електроенцефалограми з PhysioNet та інших публічних ресурсів. Дані проходили багаторівневу обробку: видалення артефактів та шумів за допомогою вейвлет-фільтрації, нормалізацію амплітудно-часових характеристик та виділення ключових ознак із використанням PCA та методів Feature Selection. Під час обробки даних приділялася особлива увага корекції пропусків та аномалій, а також інтеграції сигналів з різних джерел, що є критично важливим для навчання гібридних моделей [7; 8]

Моделі прогнозування, побудовані на основі CNN-LSTM-трансформерних архітектур, дозволяють виявляти локальні та глобальні закономірності у сигналах, інтегрувати різнорідні дані та формувати комплексну оцінку ризику розвитку патологій. Метрики оцінки точності включали ROC-криві, F1-метрику, Precision-Recall, а також середню абсолютну похибку для кількісних показників.

У ході роботи було виявлено ряд проблем, які впливають на ефективність моделей. По-перше, неоднорідність відкритих датасетів та наявність пропусків у записах значно ускладнювали навчання моделей і знижували стабільність прогнозів. По-друге, дисбаланс у представленості різних категорій пацієнтів створював перекоси під час навчання, що вимагало додаткового використання синтетичних методів балансування, таких як SMOTE. По-третє, відсутність стандартизації форматів сигналів і клінічних параметрів вимагала ретельної інтеграції даних перед використанням у моделях. Навіть сучасні архітектури нейронних мереж не забезпечують повної точності прогнозів без адаптації моделей під специфіку конкретного датасету, а також інтеграції Explainable AI, що дозволяє пояснювати прогнозні рішення для клінічного застосування [9]

Проведене дослідження показало, що інтеграція методів глибинного машинного навчання, цифрової обробки сигналів та відкритих біомедичних датасетів створює основу для побудови адаптивних систем прогнозування захворювань. Використання гібридних моделей, що поєднують згорткові та рекурентні нейронні мережі, дозволяє ефективно виявляти складні просторові та часові патерни в багатовимірних медичних даних, а трансформерні блоки забезпечують інтеграцію сигналів із різних джерел. Однак ефективність систем значною мірою обмежується якістю даних, наявністю пропусків, артефактів та відсутністю стандартизованих форматів, що потребує додаткової підготовки та узгодження датасетів перед використанням у навчанні моделей. Крім того, дисбаланс у представленості різних категорій пацієнтів у відкритих базах даних створює перекоси в навчанні та вимагає застосування адаптивних алгоритмів балансування.

Висновок. Незважаючи на високий потенціал моделей ШІ, результати дослідження показують, що для досягнення клінічно значущих прогнозів необхідно впроваджувати механізми пояснюваності Explainable AI, що дозволяють не лише прогнозувати ризики розвитку патологій, а й обґрунтовувати ухвалені рішення для лікарів. Подальший розвиток таких систем повинен бути спрямований на стандартизацію відкритих датасетів, створення адаптивних моделей, здатних працювати з неповними та різнорідними даними, а також на інтеграцію прогнозних алгоритмів із портативними та клінічними системами моніторингу, що забезпечить персоналізований підхід до оцінки стану здоров’я пацієнтів і підвищить достовірність прогнозів у практичному застосуванні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. M. Tymkovych, O. Gryshkov, K. Selivanova, V. Mutsenko, O. Avrunin and B. Glasmacher, "Application of artifi-cial neural networks for analysis of ice recrystallization process for cryopreservation", *8th European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC 2021), pp. 102-111, Nov. 29 - Dec. 3, 2021.computer vision techniques,” Przeglad Elektrotechniczny, 9 30 –33 (2021) DOI: 10.15199/48.2021.09.06

2. Y. Samokhin, O. Avrunin and V. Yavtushenko, "Cell Detection Model on Cryomicroscopic Images Using MinIO and CVAT," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunica-tions and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 514-519, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755563.

3. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С. В. Павлов, О. Г. Аврунін, С. М. Злепко, Є. В. Бодянський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. – 260 с.

4. Місоченко С. Ю. Дослідження використання вірогіднісних методів у сфері обробки біомедичних зображень / С. Ю.Місоченко, К. Г. Селіванова, О. Г. Аврунін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD2022, 19-21 жовтня 2022 р. – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – С. 902.

5. Sokol, Y., Avrunin, O., Kolisnyk, K., & Zamiatin, P. (2020). Using medical imaging in disaster medicine. Paper presented at the 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2020 - Proceedings, 287-290. doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263175

6. Selivanova K. G., Avrunin O. G. “Quality improvement of diagnosis of the electromyography data based on statistical characteristics of the measured signals ”, Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments *2016, 100312R* https://doi.org/10.1117/12.2248953.

7. Belo D. J. d. S. A. Learning biosignals with deep learning : doctoral thesis. 2020. URL: http://hdl.handle.net/10362/126518 (дата звернення: 18.10.2025).

8. PhysioNet. *PhysioNet*. URL: https://physionet.org/ (дата звернення: 22.10.2025).

9. A historical perspective of biomedical explainable AI research / L. Malinverno та ін. *Patterns*. 2023. Т. 4, № 9. URL: https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100830 (дата звернення: 19.10.2025).

УДК 615.472; 615.831

МОДЕРНІЗАЦІЯ САМОРОБНОГО ФІЗІОТЕРАПЕВТИЧНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОРЕКЦІЇ ПСИХОЕМОЦІЙНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Щєпін В. В., здобувач другого рівня вищої освіти, e-mail: vshepin228@gmail.com
Трушаков Д. В., к.т.н., доц., e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com
Центральноукраїнський національний технічний університет

Актуальність дослідження. На сучасному етапі розвитку суспільства саме психічне здоров'я людини найбільше та в першу чергу піддається негативному впливу. Це пов'язано з прискоренням темпу життя людей, зростанням в ньому ролі інформації, необхідністю постійного прийняття значної кількості складних рішень. У результаті в житті кожної людини виникають ситуації, що пов'язані з погіршенням її психоемоційного стану. Для його відновлення існує два головні підходи: медикаментозна терапія та фізіотерапія.

Медикаментозна терапія хоч вважається основним лікувальним методом, однак має ряд побічних ефектів. Крім того, є значна кількість людей, що принципово відмовляються приймати хімічні препарати. Тому все більше уваги приділяється альтернативним методам лікування таким як фізіотерапія. З розвитком фізики, появою електрики почали стрімко розвиватися штучні методи фізіотерапії, тобто ті, що дозволяють апаратними засобами відтворювати фізичні фактори, які використовуються з лікувальною метою.

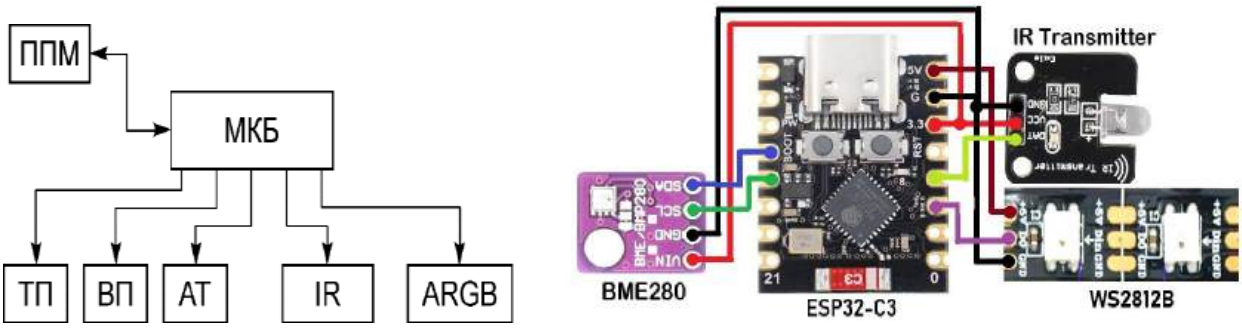
Таким чином, розробка штучних фізіотерапевтичних методів і засобів для покращення психоемоційного стану людини є актуальною.

Метою дослідження є здешевлення, покращення та модернізація експлуатаційних характеристик розробленого нами раніше пристрою для корекції психоемоційного стану людини, що випромінює світлові потоки різного кольору та частоти.

Основні матеріали досліджень. Загальновідомо, що кольори в тій чи іншій мірі впливають на психіку людини. У праці [1] представлені результати досліджень, які доводять, що використання певного кольорового оформлення сприяє більш позитивному настрою людини. Також відомо, що на настрій, здоров'я і працездатність людини суттєвий вплив має мікроклімат у приміщенні [5]. Вчені за допомогою магнітоенцефалографії відкрили динамічну геометрію нейронної репрезентації кольору [3]. Їм вдалося з'ясувати, що мозок різних людей обробляє кольори схожим чином – причому кожний відтінок кольору викликає різну активізацію мозку. На основі результатів отриманих в [1–3] та ін. нами було розроблено прилад для корекції психоемоційного стану людини [4]. В основу його роботи було покладене випромінювання світлових потоків різного кольору та інтенсивності, а також створення комфортних умов людині у приміщені (шляхом зміни температури та вологості повітря). Проведені експериментальні дослідження пристрою підтвердили, що створення різнокольорових світлових ефектів призводить до зміни α, β-ритмів головного мозку, а отже впливає на психоемоційний стан людини [4]. Однак, цей прилад мав недолік – відсутність можливості керувати кондиціонером та зволожувачем повітря в задані інтервали часу згідно заданого алгоритму роботи та значну ціну. Тому він був удосконалений шляхом повного перенесенням на нову платформу ESP32-C3, що дало змогу керувати кондиціонером і зволожувачем повітря.

На рис. 1*а* представлено структурну схему модернізованого пристрою для корекції (покращення) психоемоційного стану людини. Його основою є оновлений мікроконтролерний блок (МКБ) якій реалізовано на мікроконтролері ESP32-C3; вимірювальні перетворювачі температури повітря (ТП), відносної вологості повітря (ВП) та атмосферного тиску повітря (АТ); приймально-передавальний модуль (ППМ); IR-інфрачервоний передавач (IR) ; матриця з ARGB-світлодіодів (ARGB).

На основі розробленої структурної схеми був виготовлений макет блоку керування модернізованого пристрою який складається з таких елементів: мікроконтролер ESP32-C3; датчик температури та вологості BME280; інфрачервоний передавач IR Transmitter; матриця з ARGB-світлодіодів – WS2812B, що представлено на рис. 1*б*.



а) структурна схема пристрою *б) макет блоку керування пристрою*

Рисунок 1 – Модернізований пристрій для корекції психоемоційного стану людини

Принцип роботи макету модернізованого пристрою полягає у наступному. Після вмикання пристрою він зв'язується по радіоканалу з мобільним пристроєм користувача. Далі проводиться опитування вимірювальних перетворювачів про стан мікроклімату в приміщенні та відбувається передавання отриманої інформації на мобільний пристрій користувача (смартфон). За допомогою попередньо встановленого застосунку на мобільному пристрої користувач обирає необхідний сценарій візуальних ефектів і відповідно до рекомендацій лікаря виконує його налаштування (встановлення типу світлових ефектів, їх кольору, частоту, тривалість). Дані про температуру та вологість повітря опрацьовується приладом і за необхідності, він вмикає кондиціонер і зволожувач повітря, шляхом відтворення команд пультів дистанційного керування або за допомогою керування від смартфона. При наближені параметрів мікроклімату у приміщенні до відповідних наперед заданих значень, що відповідають прилад подає сигнал і за командою користувача запускає відтворення світлових ефектів згідно попередньо обраного сценарію за порадою лікаря психотерапевта [5].

Особливістю пристрою є те, що він може використовуватися не лише для лікування. Передбачено ряд «м'яких» сценаріїв світлових ефектів які можливо запускати кожного дня, наприклад, вранці відтворювати певні світлові ефекти, що допоможе швидше прокинутися.

Отже, розроблений макет пристрою має більш просту та дешевшу конструкцію і, в той же час, не втрачає функціоналу, а навпаки розширює її та дозволяє керувати по IR-каналу та bluetooth побутовими пристроями, що створюють мікроклімат у приміщенні.

Висновок. Розроблено макет модернізованого пристрою для корекції (покращення) психоемоційного стану людини шляхом створення та випромінення різнокольорових світлових потоків, а також створення та підтримання оптимальних мікрокліматичних умов у приміщенні, що в цілому призводять до покращення психоемоційного стану людини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Küller R., Ballal S., Laike T., Mikellides B. & Tonello G. The impact of light and colour on psychological mood: a cross-cultural study of indoor work environments. Ergonomics. 49:14, 2006, p. 1496-1507.

2. Rosenthal I. A., Singh S. R., Hermann K. L., Pantazis D. & Conway B. R. Color Space Geometry Uncovered with Magnetoencephalography. Current Biology, February 8, 2021, p. 515-526.

3. Щєпін В. В., Трушаков Д. В., Сіріков О. І. Пристрій для корекції психоемоційного стану людини. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2021. Вип. 4(35). С.100-108.

4. Патент на корисну модель №150453 від 16.02.2022 р. Щєпін В.В., Трушаков Д.В. Пристрій для корекції психоемоційного стану людини. Бюл. №7 від 16.02.2022 р.

5. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Електротехніка, електромеханіка та технології в АПК». Харків: Державний біотехнологічний університет, 2023. – С. 187-188.

СЕКЦІЯ 5. ІНТЕГРОВАНІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛО- І ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ

УДК 621.564.3

АНАЛІЗ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНИХ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ

Петренко О. В., к.т.н., доц., e-mail: petrenkoolena23@gmail.com
Смілик М. М., асист., e-mail: smilykmm@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В контексті загострення проблем енергетичної безпеки та екологічної стійкості, обумовлених негативним впливом традиційних компресійних систем охолодження на озоновий шар та глобальне потепління, набуває актуальності пошук альтернативних, високоефективних технологій. Сонячні адсорбційні холодильні системи (САХС) являють собою перспективну альтернативу, що використовує низькопотенційне сонячну енергію та екологічно чисті робочі пари, що особливо доцільно для регіонів із високою інсоляцією. САХС характеризуються простотою конструкції, відсутністю рухомих частин, що забезпечує їхню високу надійність та низькі експлуатаційні витрати.

Мета дослідження – аналіз сучасного стану розвитку САХС, оцінка їхньої продуктивності та економічної доцільності, а також виявлення перспективних напрямків для подальших наукових розробок.

Основні матеріали досліджень. У рамках дослідження нами були систематизовані та проаналізовані ключові технічні та експлуатаційні параметри, а також конструктивні рішення провідних світових прототипів сонячних адсорбційних холодильних систем (САХС). Основний акцент був зроблений на порівнянні ефективності різних робочих пар, аналізі впливу конструкції сонячного колектора-адсорбера та оцінці досягнутого середньодобового коефіцієнта корисної дії (COP).

Нами було проаналізовано три основні екологічно чисті робочі пари, які використовуються в САХС, що працюють на низькопотенційному теплі: активоване вугілля-метанол, цеоліт-вода та силікагель-вода. Вибір цих пар обумовлений їхнім нульовим потенціалом руйнування озонового шару та низьким впливом на глобальне потепління, що відповідає сучасним екологічним вимогам.

Системи на парі активоване вугілля-метанол, як показано у роботі Omisanya et al. (2012) з Нігерії, що використовували параболічні концентратори, сонячні колектори (1м^2 загальної площі), продемонстрували здатність підтримувати середню температуру випарника на рівні 11°C протягом всього денного періоду при максимальні температурі 110°C в адсорбері. Середній середньодобовий середній цикл COP знаходився в діапазоні від 0,8 до 1,5, при цьому значення сонячної радіації 14,7 МДж/м^2, що свідчить про хорошу термодинамічну ефективність, хоча цей показник відображає лише частину добового циклу [1].

У випадку пари цеоліт-вода, експериментальний пристрій, створений Крейсслером і Больцом, використовував 3м^2 ізольованих трубок сонячного колектора, наповнених цеолітом, який можна було нагрівати за допомогою штучного джерела освітлення (25,9МДж/м^2) і параболічних відбивачів [2]. Це підкреслює проблему низького загального коефіцієнта використання сонячної енергії, незважаючи на здатність досягати глибокого охолодження. Пізніше Hildbrand et al. з колектором 2м^2 на цій же парі досягли середньомісячного COP_{sol} 0,16 та продуктивності 4,7 кг льоду на 1м$_2$ колектора на день. Подальші розробки, зокрема компанії Zeo-Tech GmbH, підтвердили доцільність використання пари цеоліт-вода для сонячно-термічних льодогенераторів.

Для пари силікагель-вода ранніх японських розробки (1986) з колектором площою 0.25 м^2 та температурою адсорбційного шару 80°C COPsol 0,2. Пізніше Gurgel et al. теоретично змоделювали систему, здатну охолодити 30 кг води від 30°C до 5°C з COPsol 0,17. Це підтверджує потенціал силікагель-води для охолодження великих об'ємів рідини [3].

Аналіз конструктивних рішень виявив, що ключові проблеми, які знижують комерційну привабливість САХС, включають неефективний теплообмін та проблеми з герметизацією з плином часу. Наприклад, мобільний рефрижератор Mer і Dindi (Швейцарія), який міг зберігати холод до трьох днів завдяки акумуляції у вигляді льоду, мав складну конструкцію та незадовільну герметизацію. Для підвищення продуктивності та надійності були застосовані такі рішення, як використання подвійного скління та паралельних сталевих труб для розміщення адсорбенту, як у системі Hildbrand et al., що дозволило досягти стабільної роботи протягом 30 днів. Важливим напрямком для подолання інтермітуючого характеру сонячної енергії є акумуляція холоду у вигляді льоду, що дозволяє підтримувати температуру в камері до трьох днів без сонця. Особливої уваги заслуговує система на парі цеоліт-метанол, яка використовує термодинамічний цикл адсорбції-десорбції протягом 24 годин, знижуючи температуру до 5°C і пропонуючи рішення для медичних потреб та кондиціонування повітря за умов відсутності електроенергії. Незважаючи на постійні наукові зусилля та запатентовані розробки, такі як сонячно-термічний льодогенератор від Zeo-Tech GmbH, для досягнення конкурентоспроможності на ринку необхідне значне зниження питомих витрат або кардинальне поліпшення COP_{sol} при існуючій собівартості.

Висновок. Сонячні адсорбційні холодильні системи (САХС) є перспективною та екологічно безпечною технологією, що використовує відновлювану сонячну енергію. Ефективність САХС критично залежить від вибору робочої пари, а також від оптимізації технічних рішень у конструкції ключових елементів. Незважаючи на їхню високу екологічну та енергетичну привабливість, для досягнення широкого комерційного успіху САХС все ще потребують подальших досліджень та розробок, спрямованих на зниження питомих витрат та підвищення конкурентоспроможності порівняно з традиційними компресійними системами.

Напрями подальших включають дослідження нових адсорбентів та робочих речовин із покращеними теплофізичними властивостями та розробку інтегрованих систем, що поєднують САХС з іншими технологіями відновлюваної енергії. Необхідна оптимізація конструкції конденсаторів та випарників для мінімізації теплових втрат, а також створення інтелектуальних систем управління, здатних адаптуватися до змінних умов експлуатації, та систем моніторингу і діагностики для забезпечення безвідмовної роботи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Al-Alili A, Hwang Y, Radermacher R. Review of solar thermal air conditioning technologies // J Refrig, 2014. – Vol. 39. - P. 4–22/

2. Wang D, Zhang J, Yang Q, Li N, Sumathy K. Study of adsorption characteristics in silica gel–water adsorption refrigeration // Appl Energy, 2014. – Vol. 113. - P. 734–41.

3. A. Freni, G. Maggio, A. Sapienza, A. Frazzica, G. Restuccia, S. Vasta, Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration // Appl. Therm. Eng, 2016 – Vol. 12. - P. 3465-48.

УДК 621.56:004.77

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПЕРЕВАГ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ

Петренко О. В., к.т.н., доц., e-mail: petrenkoolena23@gmail.com
Білецький Е. В., д.т.н., проф., e-mail: bileckyj.e@gmail.com
Єрмоленко Е. М., магістрант, e-mail: egorermolenko30@gmail.com
Єрмоленко О. В., бакалаврка, e-mail: mnix.aleksandra@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. З розвитком цифрових технологій та широким впровадженням технологій автоматизації у виробництво, особливої важливості набуває впровадження систем дистанційного моніторингу в системи холодозабезпечення. Такі системи моніторингу забезпечують безперервний збір даних, контроль параметрів роботи холодильного обладнання, дають змогу своєчасно реагувати на відхилення в роботі системи і запобігати аварійні ситуації. Це є особливо важливим для галузей, де навіть незначні коливання температурних режимів може привести до втрати якості, первісних властивостей, скорочення терміну зберігання та псуванню. До таких галузей можна віднести фармацевтичну, хімічну, медичну, харчову промисловості, підприємства ритейлу та готельно-ресторанного бізнесу. Використання систем моніторингу сприяє підвищенню надійності, стабільності та енергоефективності процесів холодозабезпечення безперервного холодильного ланцюга.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності холодильних систем та обладнання за рахунок застосування дистанційної системи моніторингу для забезпечення стабільності температурних режимів та оптимізації роботи холодильного обладнання. Основна увага приділяється аналізу експлуатаційних переваг віддаленого керування, своєчасному виявленню відхилень в роботі систем холодопостачання з метою підвищення ефективності та надійності.

Основні матеріали досліджень. У ході досліджень розглянуто сучасні принципи роботи та можливості систем моніторингу параметрів холодопостачання. Особливу увагу приділено можливостям віддаленого налаштуванню параметрів, аналізу даних в реальному часі, своєчасному виявленню відхилень в роботі.

Системи дистанційного моніторингу на сьогодні відіграють важливу роль в забезпеченні безперервної роботи холодильних установок, забезпечують точний контроль параметрів роботи, що дає змогу скоротити безпосередню участь персоналу та мінімізувати ризики на похибки від «людського фактору» [1–4].

Системи моніторингу холодильного обладнання – це комплексний продукт, що складається з апаратних та програмних рішень об’єднаних в одну систему, який у режимі реального часу збирає та аналізує дані і забезпечує віддалений контроль та керування холодильним обладнанням [2–4].

Принцип роботи систем моніторингу полягає в безперервному зборі даних з електронних блоків керування встановлених на споживачах, які в свою чергу здійснює збір та обробку інформації з цифрових датчиків (датчиків температури, тиску, рівня мастила тощо) та передають інформацію на блок моніторингу. Дані з блоку моніторингу передаються на сервер або хмарне сховище звідки вже майстер знімає дані та виконує дистанційне налаштування чи корегування параметрів. Для передачі даних використовують стандарті комунікаційні протоколи, найчастіше використовують «modbus», який забезпечує сумісність між різними типами пристроїв та систем управління [5].

Сучасні системи диспетчеризації мають функцію аварійного сповіщення. При виявлені відхилень від заданого режим роботу, наприклад підвищення температури, зниження тиску,

система автоматично генерує та надсилає sms, електронний лист, push-повідомлення на задані аварійні контакти, що запобігає псуванню або втраті продукції.

Важливою перевагою системи моніторингу є можливість візуалізації об'єкта та управління ними в реальному часі. Майстер має змогу відстежувати стан у вигляді графічних зображень з поточними показниками, та відображенням аварійних ситуацій. При необхідності відкоригувати температурний режим, величину перегріву парів холодоагенту, коригувати показники датчиків, виконувати управління електронним ТРВ, вмикати або вимикати обладнання, керувати процесами відтаювання та швидкістю обертів вентиляторних вузлів конденсатору, повітроохолоджувачів тощо [1, 2].

Завдяки постійному збору і зберіганню інформації система моніторингу надає можливість аналізу даних, порівнянню роботи обладнання за аналогічні періоди, будування графіків зміни температури, тиску та перегріву.

Завдяки підтримці протоколу «modbus» є можливість підключення сторонніх пристроїв таких як лічильник електроенергії, газ-детектори, тощо [5].

Серед найпоширеніших систем моніторингу для холодильного обладнання, варто визначити «Carel Boss», «Dixell XWEB PRO», «Eliwell TelevisGo», «Danfos System Manager». Вони реалізують подібні принципи роботи дистанційного контролю та забезпечують доступ до об'єкта з будь-якої точки світу через мережу Інтернет.

Висновок. Сучасні системи дистанційного моніторингу мають широкий спектр можливостей та забезпечують централізований контроль та віддалене обслуговування без необхідності фізичної присутності. Загалом системи дистанційного моніторингу є важливим елементом управління параметрами роботи холодильних систем та обладнання. Вони дозволяють оптимізувати режими роботи, забезпечують підтримку стабільного температурного режиму, сприяють підвищенню енергоефективності та надійності холодильних систем та обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. CAREL Boss – Monitoring and supervisor system. CAREL Industries [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.carel.com/boss

2. Dixell XWEB PRO – Web Server for Refrigeration and HVAC. Dixell S.r.l. [Електронний ресурс]. Режим доступу https://www.kahancontrols.com/images/XWEB%20Pro_Datasheet.pdf

3. Eliwell Televis Go – Remote monitoring and control system. Eliwell S.r.l. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.eliwell.es/producto/televis-go/

4. Danfoss System Manager (AK-SM) – Centralized monitoring and control platform. Danfoss A/S. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.danfoss.com/en-in/products/dcs/electronic-controls/system-managers/

5. Modbus Protocol – Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. *Modbus Organization Inc.*, 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: modbus.org/specs.php

УДК 621.565.9

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ ТА ОБСЯГУ РЕСИВЕРА ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ

Петренко О. В., к.т.н., доц., e-mail: petrenkoolena23@gmail.com
Державний біотехнологічний університет
Білецький Е. В., д.т.н., проф., e-mail: bileckyj.e@gmail.com
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Актуальність дослідження. Традиційні інженерні розрахунки кількості холодоагенту, що наводяться у технічній літературі, часто є лише приблизними. Ключовим їхнім недоліком є ігнорування міграції холодоагенту по холодильному контуру в періоди простою холодильної системи. Це призводить до неточного визначення робочих параметрів та, зокрема, до помилкового визначення розмірів ресивера. Як наслідок, виникає високий ризик потенційних збоїв у роботі холодильної системи, що спричиняє фінансові втрати та необхідність позапланового обслуговування.

Мета дослідження полягає у систематизації та обґрунтуванні методології розрахунку обсягу ресивера та кількості холодоагенту в холодильних системах з урахуванням їх конструктивних особливостей та практичних умов експлуатації.

Основні матеріали досліджень. Для коректного визначення необхідної кількості холодоагенту необхідно враховувати коефіцієнт заповнення φ — відношення обсягу секції, заповненої рідиною V_F, до загального обсягу цієї секції V.

$$\varphi = \frac{V_F}{V}. \tag{1}$$

Загальна кількість циркулюючого в системі холодоагенту дорівнює M

$$M = \sum_{i=1}^{n} V_i \left(\varphi_i \cdot \rho_p + \left(1-\varphi_i\right)\cdot \rho_П\right), \tag{2}$$

де V_i – внутрішній обсяг секції установки, м^3; i – порядковий номер n секції в системі; $\rho_р$ – густина рідини, кг/м^3; $\rho_п$ – густина пари, кг/м^3.

Значення густини холодоагенту беруться з таблиць властивостей пари або діаграм властивостей, з урахуванням температури і тиску на відповідній ділянці холодильної системи [1]. Оскільки випарник та конденсатор містять як пару, так і рідину, для них використовуються дослідні коефіцієнти заповнення, які залежать від конструкції та рівня навантаження. Кількість холодоагенту спершу розраховується без урахування ресивера, оскільки його розміри суттєво залежать від схеми холодильного контуру.

Ресивер є ключовим елементом для запобігання неполадок у роботі холодильної системи, які можуть виникнути внаслідок штатних ситуацій та змін умов навколишнього середовища. Тому необхідно заздалегідь чітко визначити його функціональне призначення. Це може бути повний обсяг, призначений для прийому всього обсягу холодоагенту (наприклад, на час ремонтних робіт), або компенсаційний обсяг, який використовується для компенсації витрати холодоагенту через змінні умови експлуатації, як-от часткове навантаження чи коливання температури навколишнього середовища. Слід прагнути до використання найменшого можливого за обсягом ресивера, оскільки це дозволяє скоротити загальну кількість холодоагенту в системі, знижуючи витрати на його закупівлю та мінімізуючи потенційну екологічну шкоду у разі аварії. Хоча занадто великий ресивер не створить додаткових труднощів, він матиме високу вартість, тоді як невиправдано малий ресивер, навпаки, може стати причиною виходу установки з експлуатації.

Після обчислення необхідної кількості холодоагенту та всіх залежних від неї термодинамічних параметрів, а також детермінації функціонального призначення ресивера, що підлягає інсталяції, розраховують його робочий обсяг враховуючі конструктивні особливості холодильних систем.

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i \cdot \varphi_i \cdot \left| \left(\rho_{F_{\max}} - \rho_{F_{\min}} \right) \right|_i}{\rho_{F_{розр}}} \cdot 10^3 . \quad (3)$$

Для забезпечення необхідних допусків заповнення, обсяг компенсаційного ресивера розраховується як подвійна величина від встановленої різниці обсягів.

$$V_{компенс} = 2 \cdot \Delta V . \quad (4)$$

Для розрахунку ресивера з залишковим заповненням, що не призначений для прийому всього обсягу холодоагенту

$$V_{треб} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{0,9 \cdot \rho_{F_{розр}}} \cdot 10^3 . \quad (5)$$

Висновок. Належний розрахунок обсягу ресивера є визначальним для встановлення коректної кількості холодоагенту в системі, причому фінальна заправна маса може бути обчислена лише після врахування внутрішнього обсягу обраного ресивера.

Для компактних холодильних установок (з теплообмінниками повітряного або водяного охолодження), де основні компоненти (випарник, розширювальний клапан, компресор і конденсатор) змонтовані в єдиному корпусі, достатньо застосування малого компенсаційного ресивера для поглинання холодоагенту, після розширення.

Натомість, у холодильних системах із зовнішнім конденсатором (переважно повітряного охолодження) необхідно обов'язково враховувати можливу міграцію холодоагенту у зовнішні ділянки контуру під час зупинки компресора. Якщо розрахункова потреба в холодоагенті при простої перевищує потребу в робочому режимі, слід передбачити ресивер для вміщення цього надлишку.

Особливі вимоги стосуються холодильних систем, оснащених регуляторами тиску в конденсаторі: їхній ресивер має бути спроєктований таким чином, щоб у ньому завжди залишалася мінімально необхідна кількість холодоагенту, навіть у разі його відходу під час простою.

З точки зору безпеки, якщо ресивер може бути ізольований за допомогою запірної арматури на вході та виході, необхідно забезпечити скидання надлишкового тиску рідини. Це досягається встановленням запобіжного пристрою, наприклад, автономного клапана, що перепускає холодоагент із надлишковим тиском на бік всмоктування для запобігання перевищенню допустимого робочого тиску.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Хмельнюк, М. Г. Холодильні установки спеціального призначення: підручник / Хмельнюк М.Г., Подмазко О.С.; Одес. нац. акад. харч. технологій. - Херсон : Вид. Грінь Д. С., 2013. - 488 с.

УДК 004.382.2:621.56:621.365.9

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРОЦЕСОРА

Козін В. М., к.т.н., доц., e-mail: kvn.kon82@gmail.com
Подоляка С. А., магістр, e-mail: spodolyaka97x@gmail.com
Сумський національний аграрний університет

Актуальність дослідження. Стрімке зростання тепловиділення серверних процесорів ускладнює дотримання температурних обмежень і вимог енергоефективності у центрах оброблення даних. Термоелектричні модулі Пельтьє (ТМП), інтегровані у вузол, що включає теплорозподілювач кристала (кришку процесора), шар високотеплопровідного матеріалу (TIM), наприклад, термопасту, спеціальні прокладки тощо, охолоджуючу пластину та замкнений рідинний контур охолодження з насосом і теплообмінником (чілером), дозволяють локально керувати тепловим навантаженням і згладжувати його нерівномірність по площині поверхні кристала, однак ефективність такої системи охолодження залежить від електричних режимів керування та інших втрат енергії. Комплексна оцінка їх впливу на коефіцієнт термотрансформації елементу, *COP*, і системи в цілому, COP_{sys}, є необхідною для практичної інтеграції ТМП до сучасних серверних платформ без надлишкового збільшення споживаної потужності [1–5].

Мета дослідження – розробити та обґрунтувати термоелектричну систему охолодження для процесора Intel Xeon Platinum 9282 і кількісно визначити як струм, частота та спосіб керування, а також параметри гідравлічного контуру впливають на *COP* окремих ТМП і на системний COP_{sys}. Для цього побудувати термо-електро-теплогідравлічну модель, виконати параметричні та порівняльні дослідження для низько-, середньо- і високотемпературного режимів роботи системи охолодження, сформувати карту оптимальних робочих точок I_{opt}, та виробити інженерні рекомендації щодо джерела живлення, фільтрації пульсацій і вибору високотеплопровідних матеріалів [2–5].

Основні матеріали досліджень. Ключова ідея підвищення енергоефективності полягає у зменшенні необхідного перепаду температур на шарах вузла ТМП, $\Delta T_{ТМП}$, та у керуванні струмом так, щоб зберігати високий *COP* модулів і водночас мінімізувати втрати на перетворення [2–5]. Термомодель враховує ефекти Пельтьє, Джоуля та теплопровідності у ТМП, контактні термічні опори матеріалу стінок і конвективну тепловіддачу у мікроканалах охолоджуючої пластини [2]. Електрична модель описує залежності термо-ЕРС $\alpha(T)$, електричного опору модуля $R(T)$, теплопровідності $K(T)$ для ТМП залежно від температури T і включає вплив пульсацій струму на діюче значення струму I_{RMS} та, відповідно, на джоулеві втрати. На рівні джерела живлення застосовується перетворювач із керуванням струмом, інтерлівіюванням фаз, тобто узгодженим чергуванням роботи кількох паралельних перетворювачів, щоб їх пульсації не співпадали у часі і менше накладалися одна на одну та у підсумку на шинах живлення помітно зменшувалися коливання струму і напруги, і високим ККД, а на рівні керування – обмеження за швидкістю зміни струму $dI/d\tau$ та відносною його пульсацією $\Delta I/I \leq 3\,\%$ для наближення поведінки ШІМ до квазіпостійного струму без істотного зменшення *COP* і за умови обраного профілю електромагнітної сумісності [3–5].

У низькотемпературному режимі подача води зі зниженою температурою забезпечує роботу ТМП у зоні малих перепадів температури $\Delta T_{ТМП} = 8–12\ K$, де *COP* є максимальним [2; 4]. Моделювання показало зростання COP_{sys} завдяки низькій питомій потужності, потрібній для підтримання заданого температурного градієнта, за умови, що втрати перетворювача залишалися низькими [3; 4]. Недоліком використання такого режиму є необхідність підтримання великої витрати охолоджуючої рідини для підтримання невеликого $\Delta T_{ТМП}$ у контурі, проте гідравлічні втрати на її перекачування суттєво не впливають на загальне зростання потужності системи охолодження (близько декілька ват при $\Delta p \leq 45$ *кПа*) [2].

Середньотемпературний режим забезпечує підтримання середніх параметрів витрати, що характерно для роботи процесора у звичайному режимі. Оптимально підтримувати перепад температур на ТМП $\Delta T_{ТМП} = 10–15\ K$, що забезпечує прийнятні значення *COP*,

помірний рівень струму у ТМП та низькі пульсації. Витрату охолоджувальної води підтримують у діапазоні 1,4–1,6 *л/хв* на вузол при її нагріванні $\Delta T_{fluid} = 4\ K$. За таких умов потужність насоса та рівень шуму залишаються у межах номінальних значень [1; 2].

Високотемпературний режим дозволяє експлуатацію без чілера, тому що на вхід системи охолодження подається вода з більшою температурою. Разом з тим це призводить до збільшення величини $\Delta T_{TMП}$ і до зниження ефективності системи. Рекомендується підтримувати перепад температур у діапазоні $\Delta T_{TMП} = 12–16\ K$, що забезпечить баланс між охолоджувальною здатністю і електричними втратами у модулі та перетворювачі. Дуже важливо зменшити термічний опір у місцях контактів елементів системи охолодження (забезпечити якісний та тонкий шар ТІМ, щільне притискання поверхонь) і забезпечити високу ефективність електросилової частини. Збільшення температури теплоносія при проходженні через охолоджувальну пластину та зменшення його витрати (приблизно до 0,8–1,2 *л/хв* на вузол) знижує вимоги до насоса щодо забезпечення великої витрати, напору, потужності електроприводу, запасу по кавітації, діапазону регулювання і точності керування, акустичні вібраційні вимоги, вимоги до матеріалів та ущільнень, без помітної втрати загальної ефективності системи охолодження.

Висновок. Для всіх режимів охолодження підтверджено залежність COP_{sys} від режиму керування струмом. За низьких пульсацій ШІМ відмінність від режиму постійного струму для середніх значень *COP* стає мінімальною, проте зменшення I_{RMS} і динамічних теплових впливів суттєво покращує температурну стабільність кристала процесора [3; 4]. Криві $Q_c(I)$, $P_{TMП}(I)$ та $COP(I)$ дають змогу знаходити I_{opt} для заданих $\Delta T_{TMП}$ і теплового навантаження, а також будувати карти режимів для автоматизованого вибору контролером. Результати моделювання узгоджені із системними оцінками, у яких враховано допоміжну потужність насоса та вентиляторів і втрати на перетворення, що дозволяє робити висновки саме на рівні вузла, а не окремого модуля [1–4].

Надійність вузла охолодження визначається передусім режимами багаторазового чергування нагрівання і охолодження, контактним натиском у з’єднаннях та старінням ТІМ. Забезпечення тривалого ресурсу експлуатації реалізується через обмеження швидкості зміни температури $dT/d\tau$, уникнення різких теплових стрибків і підтримання правильного натиску між кришкою процесора і охолоджуючою пластиною ТМП. Важливо регулярно контролювати стан ТІМ, відстежувати ознаки деградації (висихання, видавлювання, збільшення термічного опору) та, за потреби, проводити заміну.

В електричній частині вирішальними залишаються мінімізація комутаційних втрат і коректна топологія плати, що одночасно знижує перешкоди, покращує електромагнітну сумісність і підвищує ККД системи живлення ТМП [3; 5]. Рекомендується використовувати багатофазний понижувальний перетворювач зі струмовим керуванням, у якому імпульси кожної фази зсунуті, щоб зменшити пульсації до $\Delta I/I \leq 3$ % і частоти комутації у діапазоні 200–400 *кГц*, підтримувати ККД перетворювача понад 94 %.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ EN 50600-1:2018. Інформаційні технології. Інфраструктура та устаткування центрів оброблення даних. Частина 1. Загальні положення (EN 50600-1:2012, IDT). – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.

2. Осташевський М. О., Петренко О. М., Юр’єва О. Ю. Теплові розрахунки електричних машин: навчальний посібник. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 450 с.

3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка: теорія і практикум: підручник. – 3-тє вид. – Київ: Каравела, 2023. – 496 с.

4. Korprasertsak N., Leephakpreeda T. Maximizing cooling/heating performance of thermoelectric modules across variable thermal loads via optimal control based on COP curves. Heliyon, 2024, 10(2): e24063. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24063.

5. Power Electronics Handbook / за ред. М. Х. Рашида. – 5-е вид. – Амстердам: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2023. – 1466 с.

УДК 621.56:536.7:620.9

ПОРІВНЯЛЬНИЙ ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНИХ ХОЛОДОАГЕНТІВ ДЛЯ МАЛИХ ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ

Кушнір В. О., асп., e-mail: kushnir.uni@gmail.com
Яковлева О. Ю., к.т.н., доц., докторант, e-mail: OYakovleva@cloud.ontu.edu.ua
Одеський національний технологічний університет

Глобальна відмова від синтетичних холодоагентів з високим GWP відновила інтерес до природних вуглеводнів [1–3], таких як пропан (R290) та ізобутан (R600a). У цьому дослідженні представлено спрощене термодинамічне порівняння R290, R600a та суміші 60/40 моль у невеликій холодильній системі з прямим розширенням (DX), система охолодження, в якій холодоагент випаровується безпосередньо всередині випарного змійовика, поглинаючи тепло з повітря або продукту без використання будь-якого проміжного теплоносія. Аналіз охоплює діапазон температур T_e: від –20 °C до 5 °C при температурі конденсації T_c 40 °C, включаючи перегрів на всмоктуванні 5 K, переохолодження 5 K та η_{is} ізоентропічну ефективність компресора 0.70, η_v об'ємну ефективність 0.80. Чисельне моделювання проводилося за допомогою програмного забезпечення вбудованих термофізичних кореляцій, незалежних від зовнішніх бібліотек властивостей. Були розраховані та порівняні ключові показники ефективності: Coefficient of Performance (COP), холодильна ефективність (q_L), питома робота компресора (w_S) та об'ємна холодильна ефективність (VRE).

Природні вуглеводні (hydrocarbons) є екологічно безпечною альтернативою HFCs та HFOs, володіючи низьким потенціалом глобального потепління (GWP < 5) та сприятливими термодинамічними властивостями. Серед них R290 та R600a стали основними кандидатами для систем малої продуктивності. R290 відрізняється високою щільністю енергії та компактною конструкцією, в той час як R600a демонструє відмінну ефективність, але низьку густину парів, що обмежує продуктивність. Змішування цих двох холодоагентів може поєднати переваги обох. У цьому дослідженні кількісно оцінюється цей компроміс для невеликих систем прямого випаровування, типових для охолоджувачів напоїв та компактних холодильних приладів.

Теплофізична модель. Тиск насичення визначався за допомогою кусково-Антуанових кореляцій, а різниці ентальпій – за допомогою емпіричних кореляцій для прихованої теплоти випаровування та постійних питомих теплоємностей. Для густини всмоктування використовувалися співвідношення ідеального газу. Властивості суміші оцінювалися шляхом усереднення парціальних тисків та питомих теплоємностей R290 та R600a за законом Рауля.

Таблиця 1 – Теплова продуктивність та об'ємний холодильний ефект (VRE) для природних холодоагентів

Теплова продуктивність					Об'ємний холодильний ефект (VRE)		
Fluid	q_L[kJ/kg]	w_S[kJ/kg]	COP	ΔCOP vs R290	ρ_1 [kg/m³]	VRE (relative)	ΔVRE vs R290
R290	~274	112	2.44	Baseline (0 %)	≈ 10 000	1.00 (ref)	0 %
R600a	~267	91	2.95	+21 %	≈ 3 600	0.36	–64 %
R290/R600a 60/40	~270	102	2.66	+9 %	≈ 7 400	0.74	–26 %

Параметри продуктивності представлені $\text{COP} = \frac{q_L}{w_S}, q_L = h_1 - h_4, w_S = h_2 - h_1$, $\text{VRE} = q_L \rho_1 \eta_v$, де q_L ефективність охолодження [кДж/кг], w_S робота компресора [кДж/кг], а ρ_1щільність пари, що всмоктується [кг/м³]. Всі результати були розраховані для всього діапазону температур T_e та експортовані у вигляді зведеної таблиці для побудови графіків та порівняння відсоткових значень. При $T_e = -10°C$ та $T_c = 40°C$ наступні характеристики тиску для R290 $P_e = 3.6$бар та $P_c = 13.7$бар, для R600a $P_e = 1.1$бар та $P_c = 5.3$бар, для суміші R290/R600a 60/40: $P_e = 2.6$бар та $P_c = 10.3$бар. Таким чином, суміш знижує тиск нагнітання приблизно на 25% порівняно з R290, зменшуючи механічне навантаження на компресор і зберігаючи при цьому дійсний тиск всмоктування (practical suction pressure) повернення масла і контролю витоків.

COP збільшується зі збільшенням T_e для всіх рідин (що характерно для нижчого співвідношення тисків). R600a досяг найвищого **COP**, приблизно на +21 % краще, ніж R290 при –10 °C, переважно завдяки нижчій роботі стискування. Суміш зберегла поліпшення **COP** на 9%, забезпечуючи при цьому більшу щільність потужності, ніж R600a. Холодильний ефект (q_i) варіюється лише на ±3% для різних рідин, що підтверджує, що різниця в ефективності зумовлена роботою компресора, а не величиною прихованої теплоти. Низька щільність пари R600a зменшує об'ємну ємність (volumetric capacity) приблизно на дві третини порівняно з R290. Суміш **R290/R600a** (60/40) відновлює приблизно три чверті ємності R290, при цьому знижуючи необхідний тиск нагнітання.

Таблиця 2 – Загальний рейтинг ефективності

??????	R290	R600a	R290/R600a 60/40
Робочий тиск	високий	низький	помірний
Енергоефективність (COP)	Базова система	↑ (+21 %)	↑ (+9 %)
Потужність компресора	висока	низька (–19 %)	помірна (–9 %)
Об'ємна продуктивність (VRE)	100 %	36 %	74 %

Суміш R290/R600a 60/40 забезпечує оптимальний баланс, зберігаючи більшу частину об’ємної продуктивності R290 та підвищуючи COP на ≈9%, при цьому тиск конденсації знижено на ≈25%, що зменшує температуру нагнітання й подовжує термін служби компресора. Усі три холодоагенти належать до класу A3 (ASHRAE 34) легкозаймисті, але малотоксичні; за незначної заправки (<150 г) ризик займання є контрольованим за належного проєктування. З екологічного погляду GWP≈3 у десятки разів нижчий за HFC-134a (≈1300), що відповідає вимогам F-газу та поправки Кігалі. R290 має найвищу об’ємну ємність і придатний для високонавантажених систем, тоді як R600a характеризується максимальним COP (+21%) але низьким VRE (–64%). Суміш демонструє компроміс: помірне підвищення ефективності при помітному зниженні тиску та прийнятному об’ємі, що робить її перспективною для малих комерційних DX-систем із низьким GWP.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ASHRAE Standard 34 (2022). Designation and Safety Classification of Refrigerants.
2. Granryd, E. (2001) “Hydrocarbons as refrigerants — an overview,” *Revue internationale du froid [International journal of refrigeration]*, 24(1), pp. 15–24. Available at: https://doi.org/10.1016/s0140-7007(00)00065-7.
3. Sánchez, D. *et al.* (2022) “Energy impact evaluation of different low-GWP alternatives to replace R134a in a beverage cooler. Experimental analysis and optimization for the pure refrigerants R152a, R1234yf, R290, R1270, R600a and R744,” *Energy conversion and management*, 256(115388), p. 115388. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115388.

УДК 637.5/620

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЖЕКЦІЙНОГО ПРИНЦИПУ ПРИ ЗАМОРОЖУВАННІ

Мольський О. С., Ph.D. докторант, e-mail: molskiyalex@gmail.com
Мольський С. М., експерт Холодильної асоціації України, e-mail: kriofor69@gmail.com
Науковий керівник – проф. Потапов В. О.
Державний біотехнологічний університет

У даній роботі наведено спосіб охолодження повітря за допомоги ежектора-теплообмінника і його доведення до потрібних параметрах для низькотемпературного охолодження продукту.

Застосування ежектора-теплообмінника в процесі заморожування м’ясної сировини є перспективним напрямом досліджень що може значно зменшити металомісткість холодильних установок, енергетичне споживання та втрату робочих речовин. Також використання ежекторних теплообмінників у харчовій промисловості призводить до позитивного результату зменшення природного усушки м'яса при холодильній обробці [1].

Ежектор це струминний насос для відсмоктування (при значному розрідженні) рідин, газів, пари або сипких мас за рахунок передачі кінетичної енергії від робочого середовища (що рухається) до відсмоктувального. Дія ежектора заснована на розрідженні, що створюється у ньому струминою іншої рідини (пари, газу), котра швидко рухається [2].

Ежектор-теплообмінник відноситься до холодильної техніки, а більш конкретно, до конвекційного теплообміну між продуктом що заморожується і може бути застосованим на підприємствах харчової промисловості в камерах, тунелях та шафах в яких заморожується дрібний харчовий продукт, наприклад курячі субпродукти, на стелажах, піддонах або конвеєрах.

Використання ежекційної системи дає змогу:

- збільшити обсяги повітря, що циркулює через стелажі з продуктом;
- збільшити швидкість повітря, що контактує з продуктом;
- збільшити інтенсивність теплообміну між продуктом та повітрям, що його охолоджує;
- скоротити час заморожування;
- не використовувати наднизькі температури повітря;
- зменшити споживання енергії компресором холодильної машини;
- подавати на продукт повітря з однаковою температурою;
- поліпшити якісні характеристики процесу заморожування як стосуються продукту, такі як зовнішній вигляд та усихання;
- зменшити собівартість холодильного обладнання що працює на більш високих температурах кипіння;
- зменшити собівартість холодильної обробки завдяки меншим енерговитратам.

Мета цієї роботи показати переваги заморожування харчових продуктів (а конкретно м’ясних виробів) із застосуванням ежектора-теплообмінника.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Когут В. Є., Бутовський О. Д., Носенко Н. Г. Проектування термоконденсатора-ежектора // Холодильна техніка та технологія, №6 (146). – Одеса, 2013.

2. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004. — Т. 1 : А — К. — 640 с.

УДК 62-97

КОНДИЦІЮВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ІЗ ПІДВИЩЕНИМ ТЕПЛОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Семенюк Д. П., к.т.н., доцент, e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Якушенко Є. М., к.т.н., доцент, e-mail: papelats@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У складі виробничих підприємств нерідко зустрічаються цехи з підвищеним тепловим навантаженням. Це можуть бути різні сушильні камери, технологічні печі для нагрівання або сушіння продукції, стерилізатори, цехи розливу напоїв та ін. Як правило, у таких приміщеннях виникають проблеми, пов'язані з підвищеною температурою повітря: значення температури можуть перевищувати +40…+50°С не лише влітку, а й у холодний період року. Це, у свою чергу, може призвести до порушення технологічного циклу виробництва, збоїв в електроніці та автоматиці керування технологічним обладнанням.

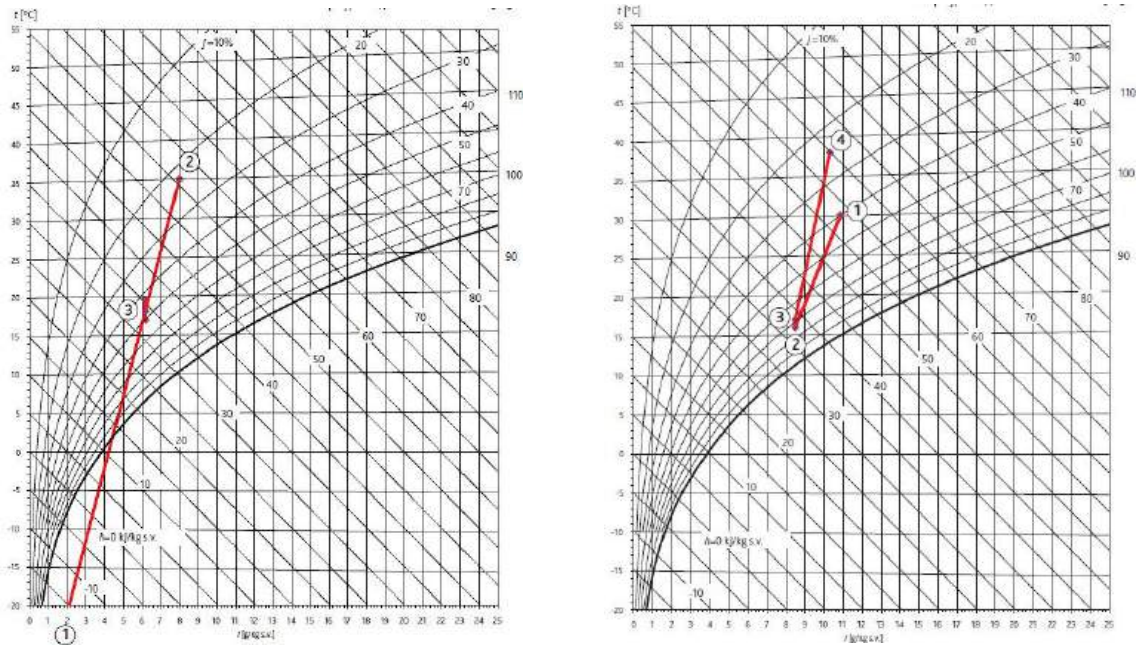
Тим часом кожен споживач прагне домогтися певних параметрів у виробничих приміщеннях при мінімальних капітальних і експлуатаційних витратах, що дозволяють мінімізувати кількість недешевих енергетичних ресурсів [1].

Мета дослідження. Як приклад розглянуто технологічну ділянку з виробництва різних компонентів для кондитерської продукції. Наведене рішення дозволяє зменшити навантаження на систему охолодження. Було запропоновано рішення, що дозволяє знизити навантаження на систему охолодження за рахунок використання води із свердловини для технологічного процесу. Слід зазначити, що аналогічні рішення досить часто застосовують у Європі. У зв'язку з цим запропонована технологія може бути рекомендована для масового застосування в нашій країні.

Основні матеріали досліджень. На багатьох підприємствах потрібна вода, і найчастіше вона надходить із власної свердловини, при цьому температура води може бути нижчою за +8…+9°С. Таким чином, частину холодильного навантаження можна переключити на воду для технологічного процесу. Були прораховані теплонадлишки та вологовиділення від технологічних ліній та обладнання, побудовано I-d діаграми процесів зміни тепловологісного стану повітря. Далі було обрано установку з секціями фільтрації, рециркуляції та охолодження в літньому режимі.

Установка розташовується на покрівлі, і працює цілий рік. У холодну пору року частина витяжного повітря повертається і підмішується до притоку, а в літньому режимі, коли температура на вулиці піднімається вище +16°С, установка працює повністю на свіжому повітрі. Подача свіжого повітря в приміщення проводиться в нижню зону для ефективного витіснення теплого відпрацьованого повітря вгору, де і забирається витяжними пристроями. Варто зазначити деякі особливості. Одна з них – зимовий режим експлуатації, коли відбувається змішання вологого теплого витяжного повітря з холодним припливним і найімовірніше поява туману та інею. У таких умовах потрібні надійні фільтри. Крім того, оскільки йдеться про приготування компонентів для виробництва харчових продуктів, необхідно забезпечити необхідну чистоту середовища на виробництві. Тому були обрані фільтри типу Hi-Flo з довгими кишенями зі скловолоконного матеріалу класу F7, що забезпечують ефективність уловлювання частинок 0,4 мкм протягом усього терміну служби фільтрів не нижче 70%. Крім того, дані фільтри забезпечують чистоту вузлів та комплектуючих самої установки підготовки повітря; зокрема, не доведеться мити водяний охолоджувач. Воду зі свердловини на подачу в охолоджувач потрібно подавати в теплу пору року і зливати при підготовці до холодного періоду року з продуванням водяного контуру охолоджувача. Це рішення дозволяє відмовитися від проміжного теплообмінника та проблем, пов'язаних із використанням гліколей [2].

На рис. 1,а наведена I–d діаграма для зимового режиму експлуатації, на рис. 1,б – для літнього.



а б

Рисунок 1 – Id діаграма системи вентиляції: а – для зимового режиму експлуатації; 1 – зовнішнє повітря, -28°С; 2 – витяжне повітря із приміщення, +35°С; 3 – припливне повітря, що надходить у приміщення, +17°С; б – для літнього режиму експлуатації; 1 – зовнішнє повітря, +30°С; 2 – витяжне повітря із приміщення, +16°С; 3 – припливне повітря, що надходить у приміщення, +17°С; 4 – відпрацьоване витяжне повітря +38°С

Система автоматичного регулювання стежить за температурою в приміщенні, залежно від температури робочої зони керує положенням заслінок секції рециркуляції і додатково для літнього режиму роботи керує регулюючим водяним клапаном для отримання необхідної холодильної потужності охолоджувача.

Повітропроводи, розташовані між установкою та входом через покрівлю в приміщення, ізолюються теплоізоляцією завтовшки 80...100 мм. Тип ізоляції, її товщина, покрив мають значення при обчисленні тепловтрат і зниженні температури як припливного повітря від вентилятора до входу в тепле приміщення, так і повітря від покрівлі до витяжного вентилятора. Крім того, потрібно прорахувати втрати тепла через корпус установки. Дані на I-d діаграмах наведені в зимовий час (з коефіцієнтом запасу) при зниженні температур шляхом припливу приблизно на 2°С, стільки ж втрачається в цілому на витяжній ділянці [3].

Висновок. Завдяки розглянутому рішенню, основне споживання енергоресурсів припадає на роботу двигунів вентиляторів, що забезпечує значну економію електроенергії в порівнянні з нагріванням свіжого повітря припливу взимку, а також охолодженням влітку з використанням холодильних машин.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Промислове кондиціювання виробничих приміщень. Режим доступу: https://frios.ua/promislove-konditsiyuvannya-virobnichih-primishhen. Назва з екрана.

2. Вентиляція і кондиціонування промислових приміщень. Режим доступу: https://alterair.ua/ventilyatsiya/kommercheskie-pomescheniya/. Назва з екрана.

3. Які бувають системи вентиляції та кондиціювання: огляд. Режим доступу: https://vents.ua/klassifikaciya-sistem-kondicionirovaniya-i-ventilyacii/. Назва з екрана.

УДК 661.1

СУЧАСНИЙ СТАН ЕКСПОРТУ МОРОЗИВА В УКРАЇНІ

Семенюк Д. П., к.т.н., доц., e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Якушенко Є. М., к.т.н., доц., e-mail: papelats@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. За даними міжгалузевої Української асоціації аграрного експорту (УААЕ), українське морозиво добре продавалось на зовнішніх ринках навіть під час пандемії COVID-19, і російська агресія теж суттєво не вплинула на об'єми поставок. За підсумками 2022 року країна експортувала в натуральному вимірі на 8% менше морозива – 6,9 тис. тонн проти 7,4 тис. тонн в 2021 році, тоді як виручка виросла на 5%.

Основними торговими партнерами в минулих роках стали Молдова, Німеччина, Ізраїль, Польща, Литва, Болгарія, Китай. Також морозиво експортувалось до США, Іраку, Сенегалу, ОАЕ, Габону, Кот-д'Івуару. Примітно, що через зміну умов для логістики і зупинку морських перевозок, експорт цього продукту до Євросоюзу збільшився на 30%, у підсумку перевищивши 9 млн. доларів США [1].

До числа топ-10 світових країн-експортерів морозива за підсумками 2022 року увійшли переважно європейські країни:

- Німеччина – 201 тис. тонн;
- Франція – 156 тис. тонн;
- Бельгія – 155 тис. тонн;
- Нідерланди – 122 тис. тонн;
- Польща – 110 тис. тонн;
- Італія – 90 тис. тонн;
- США – 73 тис. тонн;
- Таїланд – 59 тис. тонн;
- Іспанія – 58 тис. тонн;
- Угорщина – 49 тис. тонн [2].

Мета дослідження – проаналізувати стан експорту морозива в Україні під час воєнного стану.

Основні матеріали досліджень. У зв'язку з неможливістю використання традиційних шляхів експорту молочної продукції, в теперішній час працює азербайджанська морська лінія, якою контейнери від румунської Констанци рухаються до Середньої Азії. Український експортер Risoil також планує нішеві культури експортувати в контейнерах, працює над запуском контейнерної лінії. Тобто цей тренд фактично демонструє те, що проблема з логістикою рано чи пізно буде вирішена. Виробників молока в Європі дотує уряд, і це суттєво відображається на його ціні. Однак, морозиво є готовим для вживання продуктом, собівартість якого формує більш ніж два десятки видів сировини і товарів. Наприклад, розвинута деревообробна промисловість України пропонує дешеві дерев'яні палички для морозива, борошномельні підприємства дозволяють закупати дешеві вафельні стаканчики, українська упаковка, фруктові чи ягідні наповнювачі також обходяться дешевше європейських аналогів. Згідно з відомими даними, молочна сировина в Україні зараз також дешевша за європейську – ціни на пару "сухе знежирене молоко" (СЗМ)/"масло" на 25% нижчі в порівнянні з ЄС, а спотова вартість сирого молока на 7% нижче європейської. Багато українських виробників морозива не налагоджують поставки своєї продукції закордон через об'єктивні причини, такі як відсутність менеджменту, який би добре розумів бажання іноземних споживачів і грамотно підлаштовував виробництво для задоволення їхніх потреб.

За словами експертів, не вистачає спеціалістів, які б володіли високим рівнем англійської мови, професіоналів в галузі морозива, які б могли продавати його по всьому світу. Кадрова проблема дуже сильна, хоча вона і вирішиться з часом – наша молодь росте, вчить англійську і розвивається. Через це компанії самі беруть на стажування випускників

профільних університетів, влаштовують їм закордонні відрядження для обміну досвідом, тому що іншої можливості підготувати персонал для ефективної роботи з іноземним ринком не існує. Враховуючи складність підготовки персоналу, складну та дорогу логістику (доставити в центр ЕС партію, наприклад, з міст центральної України, коштує вдвічі дорожче, ніж з Варшави), українські виробники фокусуються на внутрішньому ринку.

За словами голови УААЕ, питання нарощування експорту українського морозива – це еволюційний шлях, який країна рано чи пізно пройде. Щоб українське морозиво продавалося по всьому світу, потрібно просто експортувати його багато років, працюючи над пізнаваністю бренду, вирішити логістичні проблеми, та пережити війну.

В квітні 2022 року Єврокомісія прийняла рішення на рік прибрати усі мита і квоти на український експорт, а також зупинити дію антидемпінгових тарифів – засобів, які держави застосовують для розвитку власних виробників через митні обмеження для імпортерів. Морозиво – готовий харчовий продукт, тому на нього не поширювались квоти, але діяли мита, відміна яких дозволила наростити експорт в ЕС на 30% лише за 2022 рік. Відміна мит створила сприятливу цінову кон'юнктуру для українських експортерів, що дало гарні результати, особливо з урахуванням гнучкості технології його виробництва. На відміну від фруктів, які треба роками просувати на іноземних ринках, морозиво дозволяє постійно змінювати рецептуру і наповнення продукту, тим самим підлаштовуючись під запит європейського споживача та конкуруючи з місцевим виробником.

Можна спостерігати, що сьогодні Україна активно захоплює ринок Євросоюзу. Ключова перевага України – саме її гнучкість, наш бізнес швидко підлаштовується під умови ринку". За словами голови асоціації, через різницю в стандартизації в Україні морозиво виробляють по суті за двома видами вимог – місцевими для внутрішнього ринку, і європейськими для експортних контрактів. Тобто, на одному підприємстві може паралельно працювати дві лінії – одна для місцевого споживача, і інша – експортна. Різниця в вимогах до діяльності і технології стандартизації Євросоюзу і України полягає в тому, що ЄС регламентує, як робити не можна. Тобто, все інше робити можна. А українська система стандартизації побудована навпаки: вона вказує, що робити можна. Тому для різних ринків морозиво робиться по відповідним стандартам. Через це в Україні виготовляється взагалі не сертифіковане за внутрішнім ДСТУ морозиво, повністю орієнтоване на експортні ринки [1].

Висновок. Таким чином з метою покращення стану експорту морозива в Україні бажано сконцентрувати свої зусилля на вирішенні наступних питань:

Сфокусуватися на логістиці: Необхідно підтримувати розвиток альтернативних контейнерних маршрутів (наприклад, через Констанцу до Середньої Азії) та сприяти запуску нових контейнерних ліній для зменшення високої вартості та складності доставки до ЄС. Державна підтримка може включати пільги для логістичних операторів, які працюють з експортом. Вирішення кадрової проблеми: Активізувати цільову підготовку експортного менеджменту. Компаніям слід розширити програми стажування та закордонних відряджень для випускників профільних ЗВО. Можливо, створити спільні освітні програми з фокусом на міжнародну торгівлю молочною продукцією та знання англійської. Використання конкурентної переваги: Максимально експлуатувати гнучкість виробництва (швидка зміна рецептур та асортименту) та нижчу собівартість сировини для агресивного цінового просування на ринку ЄС, особливо після скасування мит. Розвиток бренду: Спрямувати зусилля на довгострокове нарощування пізнаваності українського бренду морозива у ключових країнах-імпортерах через участь у виставках та маркетингові кампанії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Українська асоціація аграрного експорту. Режим доступу: https://uaexport.org/2023/05/16/eksport-moroziva-prodovzhuye-prinositi-stabilni-dohodi/ (дата звернення 15.10.2025). Назва з екрана.

2. Топ-20 кращих брендів морозива. Режим доступу: https://uba.top/icecream/ (дата звернення 20.10.2025). Назва з екрана.

УДК 621.565.9

ОСНОВНІ ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТА КЛІМАТИЧНОЇ ГАЛУЗІ

Семенюк Д. П., к.т.н., доц., e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Петренко О. В., к.т.н., доц., e-mail: petrenkoolena23@gmail.com
Якушенко Є. М., к.т.н., доц., e-mail: papelats@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Техніка холодильної та кліматичної галузі (ТХКГ) пройшла інтенсивні стадії становлення та розвитку у XX столітті, міцно інтегрувавшись у всі сфери життєдіяльності людини. Необхідність захисту середовища проживання, раціонального використання природних ресурсів та забезпечення продовольчої безпеки в умовах безпрецедентного зростання населення Землі (приріст на 4,5 млрд осіб) визначили високу затребуваність холодильної та кліматичної техніки як критично важливого елемента сучасної цивілізації. Яскравим прикладом цього розвитку є створення та масове розповсюдження побутових холодильників, які продемонстрували технологічні прориви в автоматизації, агрегатуванні, герметизації компресорів та використанні безпечних холодоагентів (фреонів). Масштаби їхнього розповсюдження воістину фантастичні: від 1 тис. штук у 1910 р. до 65–70 млн штук на сьогоднішній день [1].

Мета дослідження – проаналізувати сучасний стан та намітити шляхи розвитку ТХКГ

Основні матеріали досліджень. Подальший розвиток ТХКГ визначатиметься вирішенням ключових глобальних проблем:

– зростання чисельності населення та вирівнювання споживання: Прогнозоване зростання населення до 9,0 млрд. осіб до 2050 року, особливо в країнах, що розвиваються, та прагнення до вирівнювання рівня споживання (насамперед продовольства) вимагатимуть значного розширення масштабів застосування ТХКГ;

– дефіцит енергоносіїв: Обмеженість ресурсів призведе до посилення вимог до енергетичної ефективності холодильних систем та інтегрування ТХКГ у принципово нові способи вироблення та заощадження енергії;

– екологічні проблеми: Глобальне потепління (парниковий ефект) стає домінуючим екологічним викликом, витісняючи проблему озонового шару на другий план.

Основним стимулом для зростання ТХКГ залишається зростання виробництва та споживання продовольства. З 4,5 млрд тонн продовольства, що виробляється у світі щорічно, 1,5 млрд потребують охолодження. Зростання споживання на душу населення та поступове зниження частки голодуючих неминуче спричиняють збільшення матеріальних та енергетичних витрат на виробництво холоду та розвиток безперервного холодильного ланцюга (БХЛ).

БХЛ включає технології холодильного зберігання, заморожування, транспортування (автомобільний, залізничний, морський, контейнерний транспорт) та побутові прилади, забезпечуючи скорочення втрат та збереження якості продуктів на всіх етапах.

У сфері енергетики ТХКГ реалізується через:

– теплові насоси (ТН), що використовують теплоту навколишнього середовища та відходів, споживаючи в 1,5–2,0 рази менше первинної енергії, ніж пряме спалювання палива;

– установки зрідження водню та природного газу для екологічно чистого моторного палива;

– кріосистеми охолодження надпровідних матеріалів (до 30–90 К) для електромашин нового покоління та установок термоядерного синтезу (3,6–80 К).

Проблема глобального потепління, зумовлена зростанням середньорічної температури на 0,6 К за століття (дані IPCC) і прогнозованим зростанням до 3,0–6,0 К до 2100 року, вимагає радикального перегляду підходів до холодильної техніки. Головний внесок (75–85%) вносить двоокис вуглецю, але решта парникових газів (включаючи фреони) також мають значний вплив.

Це зумовлює перехід на природні робочі речовини (холодоагенти): аміак, вуглеводні, двоокис вуглецю, вода, повітря. Цей перехід має супроводжуватися підвищенням, а не зниженням, енергетичної ефективності систем.

Ключові природні холодоагенти:

– вуглеводні (пропан, бутан, ізобутан): Застосовуються в малих холодильних машинах (побутові холодильники, теплові насоси) у Західній Європі. Забезпечують високу енергетичну ефективність, незважаючи на горючість та вибухонебезпечність;

– аміак: Характеризується нульовими потенціалами руйнування озону та глобального потепління. Він легший за повітря, має різкий запах (легке виявлення витоку), має високу теплоту пароутворення та високу температуру займання. Аміак повертається з великих промислових установок у малі холодильні машини (наприклад, у торгівлю) завдяки сучасним технічним рішенням (мала заправка, герметичність, системи евакуації);

– двоокис вуглецю: Абсолютно безпечний (окрім високих робочих тисків). Вимагає створення нового базового обладнання (компресорів, теплообмінників) через надкритичне протікання циклу. Попри складнощі із забезпеченням достатньої енергетичної ефективності в циклі холодильної машини, він вже застосовується в масовому обладнанні (автомобільні кондиціонери). У циклі теплового насоса може забезпечити вищу ефективність, ніж фреонові;

– повітря: ефективне, в основному, при температурах охолодження нижче 80°C, але потенціал його ширшого застосування потребує подальших досліджень [2].

Крім продовольства та енергетики, ТХКГ відіграє важливу роль у:

– очищенні та утилізації викидів: Кріометоди (конденсація, виморожування, кріосорбція) для очищення газових потоків від шкідливих домішок, уловлювання парів вуглеводнів, вилучення цінних компонентів із газоподібних викидів (рідкі гази, дейтерій) та утилізації твердих відходів;

– штучному кліматі: Системи комфортного та технологічного кондиціювання повітря (СКВ), включаючи автономні, централізовані та транспортні системи, а також бортові системи життєзабезпечення (космічні апарати, підводні човни);

– кріомедицині та кріобіології: Кріоінструменти для хірургії, терапії та косметології, а також низькотемпературні установки (кріобанки) для консервації крові, генетичного матеріалу, органів та медичних препаратів.

Крім того, можна очікувати розвитку нових принципів отримання холоду (сорбційні металогідридні системи, термоелектричні охолоджувачі на нових напівпровідникових матеріалах, електрокалоричний ефект) та принципово нових способів (наприклад, електрогазодинамічний компресор без рухомих частин для малих машин).

Висновок. Неухильне зростання поширення та значення ТНТ прогнозується на тривалий термін. Для країн, таких як Україна, критично важливим є відновлення виробництва конкурентоспроможного базового холодильного та кліматичного обладнання (компресорів, детандерів, теплообмінної апаратури). Саме базове обладнання визначає технічний рівень галузі. Задоволення внутрішнього попиту, що зростає, за рахунок імпорту або складальних технологій з імпортних компонентів не відповідає стратегічним інтересам країни. Перспектива галузі полягає в інтеграції зі світовим досвідом та залученні зарубіжних партнерів для модернізації виробничої бази.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аудит. Режим доступу: https://kelte.ua/services/audit. (дата звернення 17.10.2025). Назва з екрана.

2. Забезпечення холодом об’єктів в умовах відсутності стаціонарного енергопостачання / Є. М. Якушенко, В. О. Потапов, Д. П. Семенюк, О. В. Петренко // ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: тренди енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В. В. Євлаш, проф. В. О. Потапова, проф. Н. Л. Савицька, доц. Л. Ф. Товма. – Х. : НА НГУ, 2020. – 635 с.

УДК 621.565

СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ БУДІВНИЦТВА СУЧАСНИХ ФРУКТОСХОВИЩ

Семенюк Д. П., к.т.н., доц., e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Ляхов Г. В., магістрант
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Станом на 2024 рік, ринок зберігання фруктів в Україні характеризується значним дефіцитом сучасних потужностей та необхідністю модернізації наявних, що критично важливо для забезпечення продовольчої безпеки та розширення експортного потенціалу. Загальний обсяг виробництва плодів та ягід в Україні сягає близько 2 млн тонн на рік. При цьому загальна ємність наявних фруктосховищ, за даними експертів, становить лише 270–335 тис. тонн. Це означає, що менше 15% врожаю може бути якісно збережено протягом тривалого часу. З цієї невеликої загальної потужності лише близько чверті оснащено сучасним обладнанням. Решта сховищ використовують звичайне холодильне обладнання або не мають його взагалі, що призводить до значних втрат під час зберігання. Значна частина наявних сховищ вимагають капітальної реконструкції або заміни, оскільки не відповідають сучасним вимогам до енергоефективності, герметичності та систем контролю клімату. Повномасштабна війна значно вплинула на галузь зберігання. На окупованих територіях та внаслідок бойових дій було знищено частину інфраструктури зберігання. Хоча основні втрати зафіксовані в сегменті овочесховищ (близько 150 тис. тонн), фруктосховища також зазнали збитків. Промислове плодівництво та, відповідно, будівництво нових сховищ, зміщується в центральні та західні регіони України, де ризики є нижчими, зокрема, у Вінницьку, Чернівецьку та Дніпропетровську області. Брак сучасних сховищ призводить до критичних проблем збуту та втрат урожаю. Відсутність сховищ з регульованою атмосферою унеможливлює тривале зберігання фруктів. Для виходу на вимогливі міжнародні ринки необхідна продукція найвищої якості, що може бути забезпечена лише сучасними технологіями, та ефективним контролем вологості та етилену. Попри складну ситуацію, спостерігається чітка тенденція до розуміння необхідності інвестування у зберігання. Нові проєкти, що будуються, переважно орієнтовані на сучасні технології, які були описані раніше: висока енергоефективність, сучасні технології та інтегровані системи контролю вологості. Для прискорення відновлення галузі необхідні державні програми підтримки та міжнародні інвестиції, спрямовані на будівництво сучасних логістичних хабів і регіональних сховищ, що вміщатимуть мінімум 10–20 тис. тонн продукції в кожній області. Загалом, ринок фруктосховищ в Україні перебуває у стані критичної нестачі потужностей, але має високий інвестиційний потенціал, що стимулює аграріїв самостійно розвивати сучасну інфраструктуру зберігання [1].

Мета дослідження – проаналізувати сучасний стан та намітити шляхи подолання кризи в галузі сучасних прогресивних фруктосховищ.

Основні матеріали досліджень. Збереження високої якості та мінімізація втрат фруктів є критичними факторами економічної ефективності сучасного аграрного бізнесу. Сьогодні традиційні методи зберігання вже не здатні задовольнити зростаючі вимоги ринку, оскільки вони часто призводять до значних втрат, що можуть сягати 3–7% і більше. Ці втрати спричинені низкою чинників: інтенсивним диханням плодів, розвитком грибкових захворювань, усушкою та нерівномірним дозріванням. Актуальність цього питання посилюється двома глобальними викликами: підвищенням енергоефективності холодильних систем та необхідністю переходу на екологічно безпечні технології та холодоагенти з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Таким чином, сучасне фруктосховище має бути не просто холодильною камерою, а інтегрованим високотехнологічним комплексом.

Головною метою проектування та будівництва сучасних фруктосховищ є забезпечення максимального терміну зберігання з мінімальною втратою якості та маси. Це досягається шляхом впровадження передових технологій регулювання газового середовища:

1. Технологія регульованої атмосфери (РА): Передбачає зниження концентрації кисню (O_2) до 1–3% та підтримку певного рівня вуглекислого газу (CO_2). Для цього сховища проєктують із високою герметичністю, використовуючи спеціальні газонепроникні сендвіч-панелі та герметичні двері. Атмосфера регулюється за допомогою азотних генераторів (PSA), які швидко знижують O_2, та скруберів CO_2, що підтримують його задану концентрацію.

2. Технологія ультранизького кисню (ULO): Концентрація O_2 підтримується на рівні 0,8–1,2%. Хоча це забезпечує максимальне гальмування фізіологічних процесів, воно вимагає надзвичайно точних аналізаторів газу та систем контролю, щоб уникнути пошкодження плодів через нестачу кисню (анаеробне дихання).

3. Динамічна регульована атмосфера (DCA): Найпередовіший метод, де рівень кисню встановлюється динамічно, безпосередньо на межі анаеробного порогу для конкретної партії фруктів. Цей метод вимагає використання складних автоматизованих систем управління (АСУ), які безперервно вимірюють фізіологічний стан плодів, часто використовуючи контроль хророфільної флуоресценції (CFC). DCA дозволяє максимально подовжити терміни зберігання та уникнути фізіологічних розладів.

Для боротьби з усушкою необхідно підтримувати відносну вологість на рівні 92–98%, застосовуючи ультразвукові або високонапірні форсункові зволожувачі та випарники із великою площею поверхні для мінімізації конденсації вологи на їхніх пластинах. Енергоефективність є ключовою проблемою, оскільки холодильне обладнання є основним споживачем енергії. Вирішення цієї проблеми починається з оптимізації конструкції сховища, включаючи використання товстих сендвіч-панелей із пінополіуретаном (PUR/PIR) для забезпечення високого теплового опору (100–200 мм).

У проєктах холодильних систем пріоритет віддається:

–Інверторному керуванню (VFD) компресорами, що дозволяє точно регулювати холодопродуктивність відповідно до потреби, мінімізуючи споживання електроенергії та пускові струми.

–Природним холодоагентам, таким як аміак (R717) або двоокис вуглецю (R744). Вони мають чудові термодинамічні характеристики, нульовий потенціал глобального потепління (GWP) і руйнування озонового шару.

–Системам рекуперації тепла, що використовують тепло, виділене конденсаторами, для обігріву ґрунту під сховищем (запобігання промерзанню) або обігріву приміщень.

–Автоматизації та захисту від патогенів. Для боротьби з патогенами та контролю етилену (гормону дозрівання), який прискорює старіння плодів, використовуються каталітичні скрубери етилену, які руйнують його молекули за допомогою хімічних реагентів або термічних процесів.

–Застосуванню легко мийних поверхонь та використання озонування або ультрафіолетового опромінення для періодичної дезінфекції.

Центральним елементом сучасного проєкту є комплексна Автоматизована Система Управління (АСУ). Вона інтегрує керування усіма підсистемами: охолодженням, газовою атмосферою, вологістю та вентиляцією, забезпечує віддалений моніторинг, оперативне коригування параметрів і автоматичну реєстрацію всіх даних, що критично важливо для відстеження продукції та відповідності стандартам якості, наприклад HACCP.

Висновок. Проєктування сучасних фруктосховищ вимагає інтегрованого підходу, що поєднує будівельні рішення, холодильні технології та системи контролю газового середовища. Застосування DCA-зберігання, високоефективного обладнання на природних холодоагентах та комплексних АСУ дозволяє не лише мінімізувати втрати та подовжити терміни зберігання (до 10-12 місяців), але й значно скоротити експлуатаційні витрати. Таким чином, сучасні інноваційні проєкти забезпечують конкурентоспроможність продукції на світовому ринку, гарантуючи її високу якість.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Поміркуємо про фруктосховища. Режим доступу: https://agrotimes.ua/article/pomirkuemo-pro-fruktoshovishcha/. Назва з екрана.

УДК 378.14

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ЕКСТРАКЦІЇ ЗРІДЖЕНИМИ ГАЗАМИ

Потапов В. О., д.т.н., проф., e-mail: potapov@bigmir.net
Білий Д. В., асп., e-mail: jimmykraun@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Переваги фреонів як екстракційних розчинників – висока селективність, низькі температури екстракції, легкість розділення, мінімальний залишок в екстракті, хімічна інертність, негорючість та низька токсичність, зробили їх надзвичайно привабливими та ефективними. Можливість регулювання властивостей зріджених газів, шляхом регулювання тиску та температури, є фундаментальним принципом проектування процесу екстракції. Ця гнучкість дозволяє розробляти високоточні методи вилучення цільових речовин із сировини. Наприклад можна здійснювати багатостадійну екстракцію, де різні фітохімічні сполуки можуть бути послідовно виділені шляхом зміни режимів та параметрів процесу.

Незважаючи на значні переваги фреонів, як екстракційних розчинників, використання їх супроводжується низкою серйозних недоліків та викликів, особливо у сфері впливу на довкілля. Всі класи фреонів (ХФВ, ГХФВ, ГФВ) є потужними парниковими газами, що мають високий потенціал глобального потепління, тому необхідно використовувати альтернативні холодоагенти дозволені до промислового використання. Всі холодильні агенти є дорогими, їх відновлення після екстрагування є енергоємним процесом і вимагають додаткового обладнання.

Типовий процес екстрагування зрідженим газами полягає в наступному. Попередньо висушену і подрібнену сировину поміщають в екстрактор і вакуумують. В екстрактор під тиском 0.1...2 МПа подають рідкий хладон. Процес екстракції здійснюється методом настоювання при температурі від –20 °С до +40 °С і тиску 1,2...1,5 МПа. Після заданого часу екстракції хладон разом із розчиненими в ньому речовинами, через фільтр зливають у випарник. Випарник підогрівається за допомогою електронагрівачів, що призводить до випаровування хладону в ньому. Після повного випаровування хладону з розчину, екстрагована фракція зливається в приймальну ємність. Пари хладону надходять у конденсатор, який охолоджується холодильним агрегатом, хладон зріджується і знову надходить у напірну ємність екстрактора.

Зважаючи на описану технологію екстракції зрідженими газами, оптимізація цього процесу та його промислове масштабування неможливо без досконалих теоретичних та експериментальних досліджень цього процесу. Одним з таких важливих напрямків є аналітичне моделювання та експериментальне дослідження кінетики екстрагування.

Існуючі фізико-хімічні моделі, які базуються на законах термодинаміки масоперенесення та хімічної кінетики занадто складні для аналітичного аналізу та оптимізації процесу екстракції. Вони використовують пряме моделювання процесу екстракції в системі тверда фаза - розчинник шляхом розв'язання рівнянь нестаціонарної дифузії з відповідними граничними та початковими умовами та урахуванням можливих хімічних реакцій цільової речовини з розчинником. Однак експериментальна перевірка отриманих даних про поля концентрацій у твердій фазі та розчиннику практична неможлива. Тому, як правило, отримані значення нестаціонарних полів осереднюються за об'ємом твердої фази та розчинника і після цього ці дані порівнюються з експериментальною кінетикою екстракції.

Крім моделей, які ґрунтуються на диференціальних рівняннях тепло - масообміну, використовуються більш простіші емпіричні моделі, які складені із залученням експериментальних даних кінетики екстракції. Більш точні феноменологічні моделі вимагають більше даних та обчислювальних ресурсів, тоді як простіші емпіричні моделі можуть бути достатніми для прогнозування та оптимізації в певних діапазонах.

Більш перспективним є метод моделювання, який базується на основних законах тепломасоперенесення, хімічної кінетики, балансових співвідношеннях для відповідних

потоків, застосованих для середньоб'ємних значень відповідних фізичних величин. Для спрощення моделювання та отримання аналітичних рішень в цьому разі найчастіше роблять наступні припущення: концентрація цільової речовини вважається постійною за координатою і залежить лише від часу; концентрація цільової речовини в екстрагенті вважається досить малою порівняно з концентрацією її в межах твердої фази; частинка твердої фази має форму кулі; коефіцієнт дифузії в твердій і рідинній фазі є постійним; основний опір процесу масопередачі зосереджений всередині твердої фази.

Саме такі припущення використані в класичній кінетичній моделі професора Аксельруда Г.А., яка багаторазово була перевірена експериментально і використовувалась у низці робіт присвячених процесам екстрагування. За експериментальними даними кінетики екстракції описана модель дозволяє визначити коефіцієнт ефективної дифузії цільового компоненту в сировині, кінетичний коефіцієнт хімічної реакції (за її наявності).

Подібний підхід до моделювання кінетики наведений в роботі. Модель кінетики екстракції побудована на наближеному розв'язанні рівняння дифузії у плоскому шарі сировини та балансових співвідношеннях для змінювання концентрацій цільової компоненти у сировині та екстрагенті.

Перевагою описаних останніх двох методів моделювання полягає в тому, що за даними регресійного аналізу експериментальних даних кінетики екстрагування можливо отримати всі тепло-масообміні коефіцієнти і, таким чином, подалі оптимізувати процес екстракції за режимами його проведення.

У той же час при застосуванні зазначених моделей для опису кінетики екстрагування рослинної сировини в зрідженому газі виявилася одна особливість не врахована в цих рівняннях. Як зазначалось вище, екстракція зрідженими газами відбувається в режимі настоювання, використання великого об'єму фреону не доцільно з економічної та екологічної точки зору, тому при невеликих відношеннях екстрагент – тверда фаза концентрація цільової речовини на міжфазній поверхні та в об’ємі екстрагенту не залишається постійною в часі а поступово збільшується. Сама цю особливість не врахована у рівняннях (1) та (2).

У зв'язку з цим метою даної роботи є розробка аналітичної моделі кінетики екстракції, яка враховує рівняння фазової рівноваги в системі цільова компонента – екстрагент за умов нерівноважної концентрації на міжфазній поверхні системи.

Для отримання аналітичної моделі екстракції з урахуванням відмічених особливостей процесу екстрагування зрідженими газами скористуємось викладеними вище припущеннями, але будемо враховувати зміну концентрації цільового компоненту на міжфазній границі та у розчині з часом, а також будемо вважати, що частинки твердої фази мають довільну форму. Для цього запишемо рівняння масоперенесення у твердій фазі в інтегральній формі

$$\int \frac{d}{d\tau} c_S dV_S = \int D_{efS} \cdot grad(c_{SF}) dF_S \,, \qquad (1)$$

де c_S – концентрація цільового компоненту у твердій фазі; D_{efS} – ефективний коефіцієнт дифузії у твердій фазі; V_S – об'єм твердої фази; τ – біжучий час; $grad(c_{SF})$ – градієнт концентрації цільового компонента на міжфазній поверхні.

Для окремої частинки після інтегрування для середніх за об’ємом концентрацій і середніх градієнтів на поверхні маємо

$$V \cdot \frac{d}{d\tau} \overline{c_S} = F \cdot D_{efS} \cdot \overline{grad(c_{SF})} \qquad (2)$$

або

$$\frac{d}{d\tau} \overline{c_S} = \frac{D_{efS}}{R_V} \cdot \overline{grad(c_{SF})}, \qquad (3)$$

де $\overline{c_S}$ – середньоб`ємна концентрація цільового компоненту у твердій фазі, $\overline{grad(c_{SF})}$ – середнє значення градієнту концентрації на поверхні частинки, R_V - відношення об’єму твердої частинки до її поверхні.

Переваги екстракції зрідженими газами – висока селективність, низькі температури екстракції, легкість розділення, мінімальний залишок у екстракті, хімічна інертність, негорючість та низька токсичність робить їх надзвичайно привабливими та ефективними.

УДК 536.7 + 58.036.6

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ АКУМУЛЯТОРІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СЕРЕДНЬОТЕМПЕРАТУРНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ КАМЕР

Потапов В. О., д.т.н., проф., e-mail: potapov@bigmir.net
Смілик М. М., асист., e-mail: smilykmm@gmail.com
Ярмак Ю. М., студ., e-mail: cezarulik@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Системи охолодження забезпечують безперервне підтримання холодового ланцюга від виробника до споживача. Ключовим питанням безпечного зберігання харчової продукції є підтримання необхідного технологічного температурного режиму. В той же час, в умовах нестабільного електропостачання, яке має місце сьогодні в Україні, складно підтримувати ці умови, що спричиняє значні втрати для харчових виробництв, торгівлі і холодильних складів.

Одним з перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є застосування акумуляторів теплової енергії (евтектичних холодильних акумуляторів – ЕХА) з фазоперехідними матеріалами (ФПМ). Заряджання ЕХА в нічний час за зниженими тарифами дозволяє використовувати накопичене тепло у денний час та зменшує рівень коливань температур, та частоту вмикання компресора. Крім того в аварійних ситуаціях, при відключенні електроенергії, накопичену енергію можна використовувати для підтримання заданого температурного режиму без втрати якості охолоджених харчових продуктів.

В інженерних розрахунках і практиці зберігання продуктів у середньотемпературних холодильних камерах (в діапазоні від 0°С до +10°С) існує допустимий діапазон коливань, який необхідно підтримувати для забезпечення якості та безпеки харчових продуктів – це ±2°С від заданої номінальної температури, а для високоякісного зберігання рекомендується ±1°С.

У даному температурному діапазоні сольові гідрати – це найпоширеніший вибір ФПМ. До їх переваг слід віднести більшу питому теплоту фазового переходу у порівняні з багатьма органічними евтектичними матеріалами (наприклад, парафіни), вища теплопровідність, що забезпечує швидший процес зарядки холодильного акумулятора. Сольові гідрати є негорючими і нетоксичними та мають низьку вартість.

У той же час вони мають ряд недоліків: переохолодження нижче температури фазового переходу, фазова сегрегація при плавленні, корозійність щодо металевих матеріалів контейнерів ЕХА, зміна об'єму під час фазового переходу, що вимагає мати запас вільного об’єму у контейнері. Тому на практиці для подолання цих недоліків потрібно додавати затравки (нуклеатори) для ініціювання кристалізації, та загусники для запобігання фазовій сегрегації. Комерційні ФПМ на основі гідратів солей майже завжди є багатокомпонентними сумішами, що містять основну сіль, нуклеатор та загусник. У якості нуклеатору, наприклад для $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, часто використовують гідроксид стронцію $Sr(OH)_2 \cdot 8H_2O$ або подібні сполуки. У якості загусників використовуються полімерні добавки: карбоксиметилцелюлозу, поліакриламіди або ксантанову камедь.

Метою дослідження є обґрунтування середньотемпературного евтектичного холодильного акумулятора на базі сольових гідратів. В таблиці 1 наведено дані про такі речовини.

Вказаний робочий діапазон ФПМ +2...+6°С обраний виходячи з рекомендованого коливання температури відносно номінального значення +4±2°С.

Методика порівняння ФПМ полягала в наступному. Вважалось, що відключення зовнішнього електроживлення відбувалось за температури в камері +2°С. Далі за рахунок зовнішнього теплопритоку відбувалось підвищення температури в холодильній камери до максимально припустимої +6°С. При цьому акумулятор холоду нагрівався від +2 °С до +6°С та ФПМ повністю переходив з твердого у рідний стан.

Таблиця 1 – Сольові гідрати

№	Температура фазового переходу	ФПМ (речовини або суміші)
1	+2 °С	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (з додаванням солей-модифікаторів)
2	+3 °С	$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ (з модифікаторами)
3	+4 °С	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ (з модифікаторами)
4	+5 °С	Евтектика на основі KCl/H_2O
5	+6 °С	Евтектика на основі $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (з модифікаторами)

Розраховувалось тривалість процесу розрядження ЕХА за відповідними рівняннями теплового балансу для однофазного та двофазного стану ФПМ у двошаровій плоскій стінці холодильної камери, яка складалась з стандартного шару теплоізоляції товщиною 100 мм та шару ФПМ такої ж товщини. Теплофізичні властивості ФПМ наведених в таблиці 1 були взяти з публічних джерел [1, 2].

На рис. 1 наведено розрахований час підтримання температури в камері від +2 ºС до +6ºС для досліджених ФПМ.

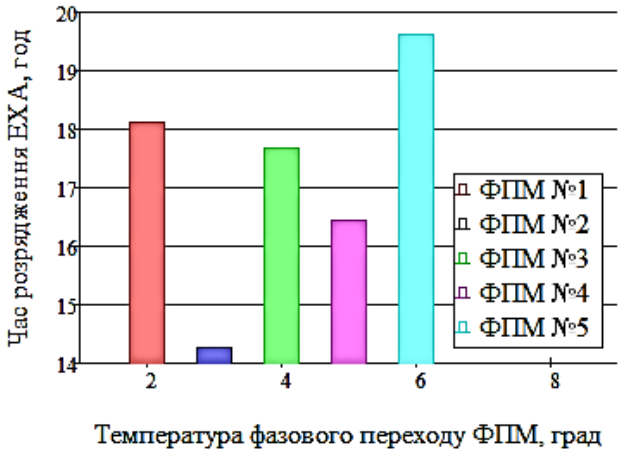


Рисунок 1 – Тривалість розрядження холодильного акумулятора від +2 ºС до +6ºС для досліджених ФПМ

Як випливає з розрахунків найбільшу тривалість автономної роботи забезпечує ФПМ на основі $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (19,5 годин) та ФПМ $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (18 годин). Найменший час розрядження виявився у ФПМ $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ (14 годин).

Висновок. Таким чином, визначено найбільш ефективну речовину для акумуляторів холоду для середньотемпературних холодильних камер в діапазоні коливань температур від +2 ºС до +6ºС.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Salt Hydrate Based Positive Temperature PCMs - PCM Products Ltd, https://www.pcmproducts.net/Salt_Hydrate_PCMs.htm

2. PlusICE® Range - PCM Products Ltd, https://www.pcmproducts.net/files/PlusICE%20Range%202021-1.pdf

УДК 621.57

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОЇ CO_2-ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Трандафілов В. В., доц. кафедри ХУКП, e-mail: vlad.trandafilov@gmail.com
Хмельнюк М. Г., зав. кафедри ХУКП, д.т.н., проф., e-mail: hmel_m@ukr.net
Одеський національний технологічний університет

В умовах глобального потепління і посилення екологічних вимог холодильні системи на діоксиді вуглецю (CO_2, R744) набувають все більшого поширення завдяки своїй екологічній безпечності та високій інтенсивності теплообміну. Проте їх ефективність істотно залежить від температури навколишнього середовища, особливо коли система працює в транскритичному режимі.

За температури зовнішнього повітря 40°C оптимальний тиск у газоохолоджувачі становить близько 95 бар, а температура газу на виході з газового охолоджувача – приблизно 38°C. У таких умовах коефіцієнт енергетичної ефективності (COP) стандартної транскритичної холодильної системи знижується до 1,9–2,0, що на 15–20 % менше порівняно з роботою за температури повітря 30°C, коли COP досягає 2,3–2,4.

Це зниження ефективності пов'язане з ростом енергоспоживання компресорів при збільшенні тиску нагнітання та зменшенням різниці ентальпій у циклі. Таким чином, оптимізація тиску газоохолоджувача, застосування мультиежекторних блоків, паралельного стискання та утилізації теплоти нагнітання стають ключовими технічними рішеннями для підвищення ефективності CO_2-холодильних систем у спекотному кліматі.

Метою є створення комплексної концепції обґрунтування та розробка схемних рішень CO_2-холодильних систем із застосуванням мультиежекторних блоків та інтегрованих абсорбційних машин, що дозволяє підвищити енергоефективність, забезпечити додаткове переохолодження холодоагенту та реалізувати ефективну рекуперацію теплоти.

З метою практичної реалізації поставлених науково-технічних завдань було запропоновано нове схемне рішення, що ґрунтується на інтеграції процесів рекуперації теплоти нагнітання та додаткового переохолодження холодоагенту. На зазначене технічне рішення подано заявку на винахід *№a202503308* «*Комбінована парокомпресійна CO_2-холодильна система*» [1].

В основу винаходу поставлено задачу створити комбіновану парокомпресійну CO_2-холодильну систему, яка використовує тепло, утилізоване під час процесу нагнітання групою сполучених між собою компресорів високого тиску, для живлення інтегрованої ежекторної холодильної машини (ЕХМ). Інноваційний підхід полягає в оптимізації процесів теплообміну та переохолодження, що дозволяє підвищити ефективність роботи системи в умовах зміни навантаження й зовнішніх температур. Синергія між ежекторною технологією та механізмом рекуперації тепла забезпечує стабільність роботи системи, знижуючи енергоспоживання й мінімізуючи втрати під час дроселювання. Це робить систему придатною для застосування в різних кліматичних умовах, включаючи ті, що характеризуються високими температурами навколишнього середовища.

Переваги використання ЕХМ для переохолодження:

- Додаткова економія до 15–25% електроенергії.
- Можливість отримання холоду для кондиціювання, технологічних процесів або переохолодження холодоагенту.
- У комбінації з паралельним стисненням та ежекторами ще +10-15% до COP.

Було проведено аналіз холодильного коефіцієнта (COP) для холодильної системи на CO_2 у кліматичних умовах міста Одеса.

Вихідні дані:

- Температура зовнішнього повітря: 35°C
- Температура випаровування НТ: -40°C, СТ: -10°C

- Теплоутилізація: є. Паралельна компресія: є. Ежектори: є.

З урахуванням структурної інтеграції ЕХМ у бустерну CO_2-систему отримано підвищене значення коефіцієнта енергоефективності. Узагальнені результати дослідження залежності COP від тиску газоохолоджувача для температур зовнішнього повітря 30°C та 40°C представлені на рис. 1.

Розрахунок показав, що при підвищенні температури зовнішнього повітря COP знижується на ~6–8% на кожні 5°C. Тиск вище 90 бар призводить до зниження ефективності, особливо при 40°C.

Як видно, максимальна ефективність досягається при тиску близько 85 бар, особливо при більш низькій температурі повітря. При 40°C COP помітно знижується, що підкреслює важливість теплоутилізації та оптимізації тиску.

Після оптимізації холодильна система на CO_2 в умовах м. Одеса досягає значення коефіцієнта COP = 3.1, що значно вище значення коефіцієнта COP = 1.9 для стандартної бустерної транскритичної холодильної системи.

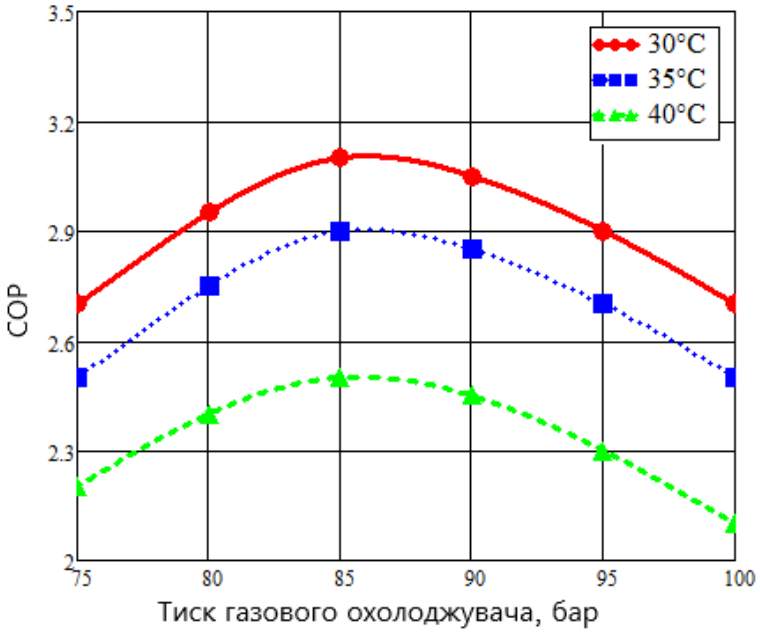


Рисунок 1 – Залежність холодильного коефіцієнта COP від тиску в газовому охолоджувачі при різних температурах зовнішнього повітря

З урахуванням використання ЕХМ оптимізований COP гібридної холодильної системи збільшився до 3.1, що на 63% вище, ніж у стандартної CO_2-системи. Таким чином гібридна система з ЕХМ знижує навантаження на компресори. Підвищується загальна енергоефективність та економія електроенергії. Оптимізація холодильних CO_2-систем для роботи в умовах високого тиску в спекотному кліматі – ключ до підвищення їхньої енергоефективності та розширення сфери застосування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Заявка на винахід №a202503308. Комбінована парокомпресійна CO_2-холодильна система / [Трандафілов В. В., Хмельнюк М. Г.]. – Подана 2025. – Укрпатент.

УДК 303.732.4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛООБМІННИКУ

Цуркан М. М., к.т.н., доц., e-mail: tsurkan_n@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Математичне моделювання основних процесів та пристроїв дозволяє інженерам та вченим ефективно проектувати та оптимізувати системи, що використовуються у технологічних машинах та устаткуванні. Розуміння теоретичних основ та практичне застосування математичних моделей є ключем до їхнього успішного використання.

Мета дослідження – застосуванням даної математичної моделі можна виконати дослідження впливу температури, витрати теплоносія та холодоагенту, розмірів апарату на процес теплообміну.

Основні матеріали досліджень. При побудові математичних моделей теплообмінних апаратів попередньо проводиться аналіз структури руху потоків в апараті. Для кожного потоку записується математичний опис у вигляді виразу, що характеризує зміни температури в потоці теплоносія в часі, обумовлений рухом потоку і теплопередачею. Попередньо формулюються припущення [1].

Розглянемо теплообмінник типу труба в трубі в якому охолоджується рідина (рис. 1). Холодоагент і рідина, що охолоджується, рухаються прямострумом. Необхідно розрахувати температуру теплоносіїв на виході з апарату та отримати температурні профілі за довжиною апарата. У вихідних даних до розрахунку для обох потоків (відповідно індекси 1 і 2) вказуються: температура Т, °С; об'ємна швидкість υ, м^3/с; густина ρ, кг/м^3; теплоємність C_p, Дж/кг; діаметр труби *d*, м

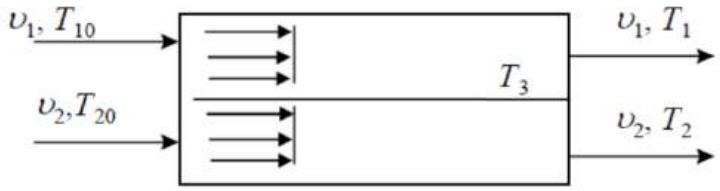


Рисунок 1 – Схематичне зображення теплообмінника

Для даного типу теплообмінника реалізується режим «витіснення-витіснення», тому математичний опис матиме вигляд

$$\begin{aligned} S_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= -\upsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial l} + \frac{F_1}{L} \cdot K_T \cdot (T_1 - T_2); \\ S_2 \cdot \rho_2 \cdot C_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial t} &= -\upsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot C_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial l} + \frac{F_2}{L} \cdot K_T \cdot (T_1 - T_2). \end{aligned} \quad (1)$$

де F_1, F_2 – відповідні поверхні теплообміну, м^2; S_1, S_2 – площі поперечного перетину потоків, м2; *L* – довжина теплообмінника, м; K_T – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м2·К);

У стаціонарному режимі роботи теплообмінника, коли $\partial T_1 / \partial t = 0$; $\partial T_2 / \partial t = 0$, рівняння теплового балансу набудуть наступного вигляду:

$$\begin{cases} \dfrac{dT_1}{dl} = -\dfrac{K_T \cdot \pi \cdot d}{\upsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1}} \cdot (T_1 - T_2); \\ \dfrac{dT_2}{dl} = \dfrac{K_T \cdot \pi \cdot d}{\upsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot C_{p2}} \cdot (T_1 - T_2), \end{cases} \quad (2)$$

де d – діаметр труби теплообмінника, м.

Для зручності обчислення введемо позначення:

$$b_1 = \frac{K \cdot \pi \cdot d}{\upsilon_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1}};$$

$$b_2 = \frac{K \cdot \pi \cdot d}{\upsilon_2 \cdot \rho_2 \cdot C_{p2}}.$$

Систему отриманих диференціальних рівнянь (2) розв'язуємо за допомогою чисельного методу Ейлера:

$$\begin{cases} T_1^i = T_1^{i-1} - hb_1\left(T_1^{i-1} - T_2^{i-1}\right); \\ T_2^i = T_2^{i-1} + hb_2\left(T_1^{i-1} - T_2^{i-1}\right), \end{cases} \quad (3)$$

де i – номер кроку по довжині теплообмінника; h – крок інтегрування за довжиною теплообмінного апарату.

На рис. 2 наведено результати розрахунку процесу теплообміну.

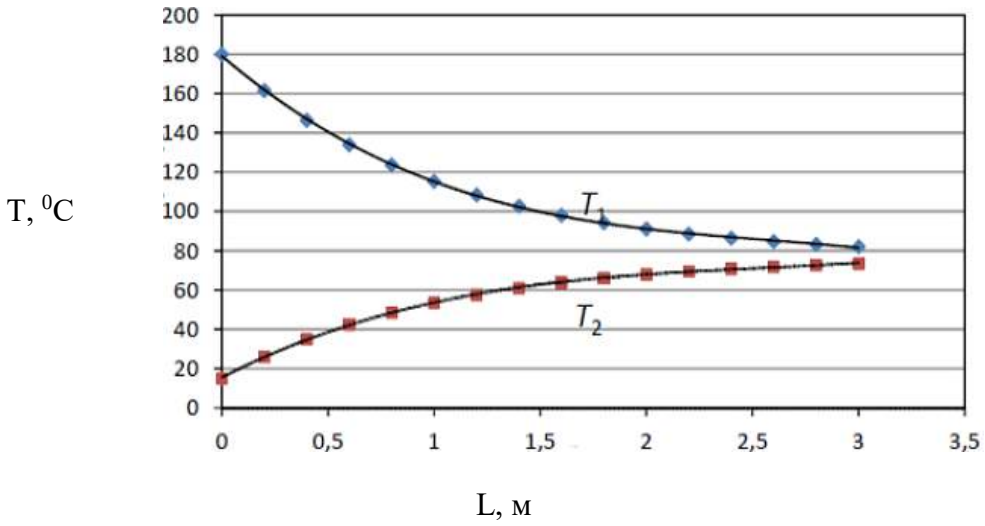


Рисунок 2 – Зміна температури по довжині теплообмінного апарату

Висновок. Таким чином, із застосуванням даної математичної моделі можна виконати дослідження впливу температури, витрати теплоносія та холодоагенту, розмірів апарату на процес теплообміну.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. – К. : НАУ, 2017. – 392 с.

УДК 621.56:004.89:620.9

ХОЛОДИЛЬНА ПІДСИСТЕМА «ВИРОБНИЦТВО» ДЛЯ ХОЛОДОВОГО ЛАНЦЮГА ТА ПРОГНОЗОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ AI

Яковлева О. Ю., к.т.н., доц., докторант, e-mail: OYakovleva@cloud.ontu.edu.ua
Хмельнюк М. Г., д.т.н., проф., e-mail: hmel_m@ukr.net
Яковлев Ю. О., к.т.н., доц., e-mail: uykovlev11@gmail.com
Одеський національний технологічний університет

Енергетична ефективність холодильних систем холодового ланцюга є ключовим чинником сталого зберігання харчових продуктів. Сучасні системи прогнозованого управління на основі штучного інтелекту (AI) дозволяють передбачати потребу в охолодженні та автоматично регулювати параметри компресора, вентилятора, знижуючи споживання електроенергії та підтримуючи стабільну температуру. **Метою дослідження** є створення термодинамічної моделі та енергетичного розрахунку холодильної підсистеми для попереднього охолодження томатів у виробничому вузлі холодового ланцюга та розроблення моделі прогнозованого управління на основі даних. Завдання включають визначення основних теплових навантажень (чутливих, прихованих, біохімічних), оцінку добового енергоспоживання й пікової холодопродуктивності, формування базових параметрів автономної системи на природному холодоагенті R290 з живленням від сонячних панелей, а також застосування машинного навчання LSBoost для прогнозування електричного навантаження та оптимізації швидкості компресора, роботи вентилятора та температурних показників з метою зменшення споживання енергії при дотриманні меж безпечного зберігання(0–4 °C).

Таблиця 1 – Методи дослідження [1–4]

Компонент	Позначення / Формула
Модель прогнозування надана градієнтним бустингом (LSBoost) з ансамблю *M* дерев регресії, що мінімізує похибку прогнозу, було сформульовано Джеромом Х. Фрідманом (1999, 2001)	$\hat{y}_i = F_M(x_i) = \sum_{m=1}^{M} \nu\, f_m(x_i)$ де $F_M(x)$ кінцевий ансамбль M дерев регресії $f_m(x)$, кожен масштабується за швидкістю навчання ν.
Оновлення моделі, ітераційне уточнення прогнозу за залишками	$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \nu\, f_m(x)$
Оцінка точності, похибка середня абсолютна та відносна; отримано ***MAE = 0.59кВт, MAPE = 5.6%***	$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lvert\, y_i - \hat{y}_i \,\rvert$, $\mathrm{MAPE} = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n} \left\lvert \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right\rvert$
Оптимізаційна функція, мінімізація енергоспоживання з урахуванням температурних і експлуатаційних обмежень	$J = \hat{P}_{load} + \lambda_T P_T + \mu_W P_W$
Керуючі дії, зміни показників температури та швидкості виконавчих механізмів	$u = [\Delta T_{set}, \Delta v_{fan}, \Delta v_{comp}]$
Обмеження, забезпечення стабільності температури в допустимому діапазоні	$T_{min} \le T_{room} \le T_{max}$

Об’єктом є модульна камера об’ємом 36 м³, розрахована на 5 т/добу томатів. Розрахунок виконано для діапазону температур 0–4 °C при зовнішній температурі 35 °C і вологості 50 %. Враховано такі складові теплового балансу: охолодження продукту (з 25 °C до 4 °C), Дихання плодів 0.5 кВт·год/добу, Волога, що випаровується 2.6 кВт·год/добу, Інфільтрація повітря (чутлива + прихована) 9.7 кВт·год/добу, Теплопередача через

огородження 31 кВт·год/добу, вентилятори, освітлення, розморожування 11 кВт·год/добу, загальне навантаження на випарник 162 кВт·год/добу, (COPдійсний) ≈ 2.8, енергоспоживання компресора ≈58 кВт·год/добу, пікова холодопродуктивність ≈ 18 кВт, тепловиділення у конденсаторі ≈ 220 кВт·год/добу. Холодильна система використовує R290 (пропан) у схемі з інверторним компресором, сонячну станцію ~16 кВт-пік (вимірювання максимальної потужності, яку може генерувати сонячна фотоелектрична система за оптимальних стандартизованих умов випробувань), та акумулятор 40 кВт·год брутто літій-іонний (≈31 кВт·год корисного використання).

Модель Gradient Boosting (LSBoost) формує ансамбль дерев для мінімізації прогнозної помилки, досягаючи ***MAE = 0.59кВт*** та ***MAPE = 5.61%.*** Оптимізаційний модуль використовує прогноз навантаження для формування керуючих дій ***u***, що зменшують споживання енергії без порушення температурних меж.

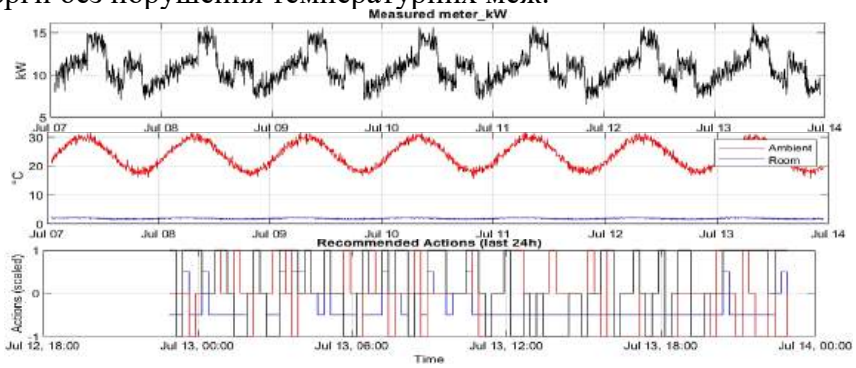


Рисунок 1 – Результати Gradient Boosting (LSBoost):
Validation MAE =0.590 kW, Validation MAPE =5.61 %, (Recommendation (next hour)) - Setpoint shift (K) =0.5, Evap fan shift (%pt)= +0, Compressor speed shift (%pt)= +10, Predicted meter kW in 60min= 9.13 kW

Результати підтверджують, що стратегія прогнозованого управління на основі ШІ ефективно оптимізує роботу холодильної системи, прогнозуючи теплове навантаження та коригуючи параметри в реальному часі. Упродовж тижня моделювання (7–14 липня 2025 р.) система підтримувала стабільну температуру ***1–3 °C*** при зовнішніх коливаннях ***25–32 °C*** і зменшила пікові навантаження компресора та вентилятора. Досягнута точність прогнозу (***MAE = 0,59 кВт; MAPE = 5,61 %***) забезпечила можливість превентивного регулювання. Завдяки помірним коригуванням ***±10 %*** швидкості компресора/вентилятора та ***±0,5 K*** показники споживання потужності згладжено до ***8,7–10 кВт*** проти початкових ***16 кВт.*** Загалом система забезпечила до ***15 %*** економії енергії при підтриманні належного температурного режиму зберігання продукту й підвищила ресурс компресора. Реалізована модель прогнозування на основі AI ефективно поєднує аналітику даних з термодинамічних обмежень для зниження енергоспоживання холодильної системи за рахунок динамічної адаптації керуючих змінних. Використовуючи алгоритм Фрідмана, система навчається на основі історичних даних про роботу та прогнозує майбутній попит, забезпечуючи точність прогнозування навантаження та оптимізацію енергоспоживання. Ця структура забезпечує основу для інтеграції холодильних підсистем з використанням поновлюваних джерелах енергії з автономною логікою керування холодильним ланцюгом (Smart Refrigeration).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Friedman, J.H. (2000) *Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine*, *Researchgate.net*. Available at: https://doi.org/10.1214/aos/1013203451.

2. Friedman, J.H. (2002) "Stochastic gradient boosting," *Computational statistics & data analysis*, 38(4), pp. 367–378. Available at: https://doi.org/10.1016/s0167-9473(01)00065-2.

3. Breiman, L. (1996) "Bagging predictors," *Machine learning*, 24(2), pp. 123–140. Available at: https://doi.org/10.1023/a:1018054314350.

4. Leo Breiman, Jerome Friedman, R.A. Olshen, Charles J. Stone (2017). Classification and Regression Trees. Chapman & Hall/CRC.. https://doi.org/10.1201/9781315139470

УДК 641.78:664

ІННОВАЦІЙНІ СТРАТЕГІЇ СТАЛОГО ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ

Якушенко Є. М., к.т.н., доц., e-mail: papelats@ukr.net
Семенюк Д. П., к.т.н., проф., e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Холодильні та кліматичні системи (ХКС) є фундаментальним компонентом сучасної цивілізації, критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки, збереження фармацевтичних препаратів, підтримання комфортних умов праці та життя. Економічне зростання та урбанізація ведуть до неухильного збільшення попиту на холод, що ставить перед світовою спільнотою серйозний екологічний виклик. Традиційні ХКС історично характеризуються значним енергоспоживанням та використанням фторовмісних холодоагентів з високим потенціалом глобального потепління (GWP) та/або потенціалом руйнування озонового шару (ODP).

Незважаючи на незаперечну користь, сукупний вплив сектора ГКС на довкілля є значним: за оцінками, на нього припадає до 7–10% світового споживання електроенергії та, у разі витоків холодоагентів, суттєвий внесок у викиди парникових газів (ПГ). У контексті глобальних кліматичних цілей, закріплених у Паризькій угоді та в рамках зобов'язань Монреальського протоколу та його Кігалійської поправки, нагальна необхідність переходу до екологічно чистих та стійких холодильних технологій стає пріоритетним науковим та інженерним завданням.

Історично, з моменту появи перших парокомпресійних холодильних машин у XIX столітті, основний акцент робився на продуктивності та надійності. Використання холодоагентів, таких як хлорфторвуглеці (ХФВ) та гідрохлорфторвуглеці (ГХФВ), хоча і забезпечило технологічний прорив, призвело до критичного виснаження озонового шару. Впровадження Монреальського протоколу (1987) ініціювало перехід на гідрофторвуглеці (ГФВ), які, не руйнуючи озон, мають дуже високий GWP (наприклад, R-404A, R-134a), що робить їх потужними парниковими газами.

Ключові екологічні проблеми сучасних ГКС:

- Прямі викиди (витік холодоагентів): потенціал глобального потепління цих речовин може у тисячі разів перевищувати потенціал, що робить навіть невеликі витоки критично важливими.

- Непрямі викиди (енергоспоживання): більша частина кліматичного впливу ГКС (до 80% за весь життєвий цикл) пов'язана з викидами, що виникають при виробництві електроенергії для їх живлення. Особливо це актуально для застарілих неефективних систем.

- Неефективність обладнання: старі компресори, недостатня або пошкоджена теплоізоляція, а також неоптимальне керування процесами призводять до надмірного споживання енергії, збільшуючи експлуатаційні витрати та екологічне навантаження.

Отже, сталий розвиток галузі потребує комплексного підходу, орієнтованого як зниження GWP холодоагентів, і на кардинальне підвищення енергетичної ефективності.

Інноваційним напрямом стійкого холодопостачання це перехід на природні та низько-GWP холодоагенти.

Це ключовий стратегічний пріоритет, що стимулюється Кігалійською поправкою, яка потребує поетапного скорочення виробництва та споживання ГФВ. Природні холодоагенти мають потенціал GWP, близький або рівний нулю.

Вуглекислий газ є нетоксичним, негорючим, має GWP=1. Ефективний у каскадних та транскритичних системах. Транскритичні системи (найбільш актуальні для супермаркетів та промислового холоду) вимагають складного інженерного підходу, але пропонують високу енергоефективність у помірному та холодному кліматі.

Аміак відрізняється чудовими термодинамічними характеристиками та GWP=0. Однак його токсичність вимагає застосування складних заходів безпеки, обмежуючи використання, як правило, великими промисловими та централізованими установками.

Вуглеводні мають дуже низький GWP (<5) і високу енергоефективність. Їхня горючість обмежує заправну масу, роблячи їх ідеальними для побутових і комерційних холодильників малої та середньої потужності.

Гідрофторолефіни – це нове покоління синтетичних холодоагентів (наприклад: R-1234yf, R-1234ze), які мають GWP < 5, тобто зневажливо низький. Вони мають характеристики, схожі на ГФВ, що полегшує їх впровадження в існуючі технології, проте їх довгостроковий вплив на навколишнє середовище продовжує вивчатися.

Енергоефективність – другий стовп стійкості, тому що вона прямо впливає на непрямі викиди. Інновації у цьому напрямі включають:

• Високоефективні компресори: перехід на інверторні технології (Variable Speed Drive - VSD) та компресори з цифровим керуванням (наприклад, спіральні або гвинтові компресори з регулюванням продуктивності) дозволяє точно відповідати мінливим тепловим навантаженням, уникаючи неефективних циклів «вмикання-вимикання» та значно знижуючи споживання енергії.

• Удосконалена теплоізоляція: використання вакуумних ізоляційних панелей (VIP) та вдосконалених пінополіуретанових систем з покращеними теплофізичними властивостями для мінімізації припливу тепла ззовні.

• Рекуперація тепла: у промислових і комерційних ГКС тепло, що відводиться від об'єкта, що охолоджується, може бути повторно використаний

У промислових і комерційних ГКС тепло, що відводиться від об'єкта, що охолоджується, може бути повторно використано для опалення приміщень, гарячого водопостачання або інших технологічних потреб, що значно підвищує загальну ефективність системи.

Перехід до сталого холодопостачання – це не просто екологічна необхідність, а й ключовий напрямок технологічного прогресу у XXI столітті. Сучасні інновації, засновані на впровадженні природних холодоагентів, кардинальному підвищенні енергоефективності за рахунок VSD-технологій та інтеграції II та IoT, дозволяють суттєво знизити кліматичну дію ХКС без шкоди для їхньої продуктивності та надійності.

Перспективи подальших досліджень та розробки цьому напрямі спрямовані:

1. Некомпресійні технології – активне вивчення та комерціалізація альтернативних методів охолодження, таких як магнітокалоричний ефект, термоакустичне охолодження та адіабатичне дезорієнтування, які можуть повністю виключити використання парникових холодоагентів.

2. Герметизація та утилізація – удосконалення методів мінімізації витоків холодоагенту протягом усього життєвого циклу обладнання та розробка більш ефективних, економічно доцільних технологій для збирання, регенерації та утилізації існуючих ГФВ.

3. Теплові насоси для екстремальних умов – розвиток високотемпературних теплових насосів на природних холодоагентах для ефективного використання тепла, що відходить, а також систем, здатних стабільно працювати в умовах екстремальних кліматичних зон.

Активне міжнародне співробітництво та послідовна реалізація жорстких регуляторних вимог у поєднанні з науково-технічними проривами в галузі матеріалознавства та цифрових технологій прокладають шлях до створення холодильної індустрії з нульовим чистим кліматичним впливом – ключовим елементом сталого енергетичного майбутнього планети.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Проблеми техногенної та продовольчої безпеки. URL: https://www.nio-holod.com.ua/2007-3-2.pdf

2. Зменште рахунок за опалення супермаркету та зменште викиди CO_2 за допомогою блоку рекуперації тепла Danfoss. URL: https://www.danfoss.com/uk-ua/products/dhs/stations-and-domestic-hot-water/substations/hru-heat-recovery-unit/#tab-overview

3. Прискоримо зміну холодоагенту і зменшимо вплив на клімат. URL: https://assets.danfoss.com/documents/151201/AD135486444159uk-UA0904.pdf

УДК 641.78:664

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ СТІЙКОГО, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТА ПРОГНОЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ХОЛОДИЛЬНИМИ ТА КЛІМАТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Якушенко Є. М., к.т.н., доц., e-mail: papelats@ukr.net
Семенюк Д. П., к.т.н., проф., e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

В епоху прискореного технологічного розвитку та зростання глобальної торгівлі, холодильна індустрія стоїть перед подвійним викликом: необхідністю забезпечення бездоганної якості зберігання продукції та зобов'язанням щодо зниження колосального енергоспоживання та пов'язаного з ним вуглецевого сліду. Традиційні системи управління, засновані на жорстких параметрах та ручному моніторингу, вичерпали свій потенціал для подальшої оптимізації.

Рішення цього феномена полягає у цифрової трансформації, ініційованої синергією Штучного Інтелекту (ШІ) та Інтернету Речей (IoT). Ці технології стали не просто інструментом автоматизації, а рушійною силою інновацій, пропонуючи революційні підходи до проектування, управління та обслуговування холодильних та кліматичних систем. Впровадження IoT-датчиків формує цифровий двійник холодильної установки, надаючи безпрецедентний масив даних у реальному часі, тоді як ШІ-алгоритми перетворять ці дані на прогнозні моделі та автономні управлінські рішення.

Інтернет Речей (IoT) виступає як нервова система інтелектуальної холодильної установки. Розподіл мережних датчиків по всьому обладнанню (всередині камер, в компресорних агрегатах, на конденсаторах та в зонах логістики) дозволяє безперервно збирати і передавати в хмарні платформи великі дані (Big Data) про критично важливі параметри:

• Температурні профілі (з високою деталізацією, за винятком «мертвих зон»).
• Рівень вологості та концентрація газів (наприклад, етилен у камерах для фруктів).
• Вібрація та акустичний шум компонентів (для ранньої діагностики механічних проблем).
• Тиск та витрата холодоагенту.
• Енергоспоживання окремих вузлів у реальному часі.

Віддалений моніторинг (Remote Monitoring), реалізований через IoT, забезпечує повну прозорість та видимість усієї холодильної інфраструктури, дозволяючи операторам контролювати роботу обладнання з будь-якого пристрою, підключеного до Інтернету. Ця цифрова прозорість є необхідною умовою для наступних інтелектуальних функцій.

Ключова перевага ШІ полягає в його здатності аналізувати накопичені IoT-дані, навчатися на основі минулих сценаріїв та формувати адаптивні, прогнозні сценарії управління, що виходять за межі статичних налаштувань традиційних контролерів.

Однією з найбільш значущих галузей застосування ШІ є оптимізація енергоспоживання. ШІ-алгоритми здатні:

• Прогнозувати теплове навантаження: аналізуючи зовнішні фактори (температура навколишнього середовища, погодні умови) та внутрішні (завантаження камери, частота відкриття дверей, час доби, історичні патерни споживання), ШІ може передбачити необхідну потужність охолодження на найближчий годинник чи добу.

• Оптимізація роботи компресорів: ШІ динамічно регулює швидкість і потужність компресорів, а також керує вентиляторами та дросельними пристроями (наприклад, електронними розширювальними клапанами). Це забезпечує стабільну температуру без стрибків (мінімізуючи надмірне охолодження та пов'язані з ним втрати) і дозволяє компресору працювати у його найбільш енергоефективному режимі (наприклад, як у технології AI Hybrid Cooling від Samsung).

• Керування циклами відтавання: замість того, щоб покладатися на фіксований таймер,

ШІ-моделі використовують дані про перепад тиску, температуру випарника та вологості, щоб визначити оптимальний час і тривалість циклу відтавання – тільки коли це дійсно необхідно. Це скорочує кількість непотрібних циклів, які є значним джерелом теплового навантаження та енерговтрат. В результаті досягається значне зниження експлуатаційних витрат та зменшення вуглецевого сліду системи.

Прогнозуючий сервіс є, мабуть, найбільш економічно вигідною функцією ШІ в холодильній техніці. Замість реактивного ремонту («поломка – виклик спеціаліста») або планово-попереджувального обслуговування («ремонт за графіком, навіть якщо не потрібно»), ШІ-алгоритми використовують методи машинного навчання (ML) для аналізу аномалій даних IoT.

Це дозволяє проводити цілеспрямований ремонт у зручний час, мінімізувати незаплановані простої (що особливо критично для фармацевтики та харчової промисловості) та продовжити термін служби обладнання.

ШІ та IoT забезпечують безпрецедентний рівень контролю за умовами зберігання, що безпосередньо впливає на якість, свіжість та безпеку продукції.

ШІ здатний аналізувати специфічні вимоги до зберігання для різних типів продуктів, які можуть бути в одній камері (наприклад, м'ясо, молочні продукти, овочі). На основі даних про склад завантаження, ШІ може тонко адаптувати параметри (наприклад, невеликий зсув температури або вологості) для максимального продовження терміну придатності, знижуючи відсоток псування та відходів. Розумні холодильники можуть навіть відслідковувати стан та кількість продуктів та надсилати повідомлення про необхідність замовлення нових.

Системи віддаленого моніторингу та прогнозної аналітики забезпечують цілодобовий контроль, дозволяючи оперативно реагувати на будь-які критичні відхилення (наприклад, підвищення температури, вимкнення живлення). Це життєво важливо для таких об'єктів, як аптеки, медичні установи та склади з високоцінними або швидкопсувними вантажами. IoT-датчики, інтегровані з контролем доступу, додатково підвищують безпеку та дотримання нормативних стандартів (HACCP).

Цифрова інтеграція виходить межі однієї холодильної камери. ШІ та IoT революціонізують логістику холодового ланцюга (Cold Chain Logistics), забезпечуючи наскрізну прозорість та контрольованість від виробництва до кінцевого споживача.

Інтеграція Штучного Інтелекту та Інтернету Речей в управління холодильними та кліматичними системами є не просто еволюцією, а необхідною трансформацією. Ці технології формують нову парадигму, засновану на прогнозності, адаптивності та автономності.

Від підвищення енергоефективності через динамічне управління компресорами та циклами відтавання до реалізації прогнозного обслуговування, що мінімізує простої, та забезпечення бездоганної якості зберігання продуктів – ШІ та IoT пропонують комплексне рішення, яке перевершує можливості традиційних систем. Впровадження цих технологій є ключем до створення стійких, надійних та інтелектуальних систем, здатних не лише відповідати, а й проактивно формувати вимоги сучасного холодового ланцюга, приносячи значні економічні, операційні та екологічні вигоди.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Проблеми техногенної та продовольчої безпеки – URL: https://www.nio-holod.com.ua/2007-3-2.pdf.

2. Семенюк Д. П. Технологічне холодильне обладнання [Електронний ресурс] : навч. посібник : у 2 ч. Ч. 1 / Д. П. Семенюк, О. В. Петренко. – Електрон. дані. – Х. : ХДУХТ, 2018. – С. 241.

3. Забезпечення холодом об’єктів в умовах відсутності стаціонарного енергопостачання / Є.М. Якушенко, В.О. Потапов, Д.П. Семенюк, О.В. Петренко // ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: тренди енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. Н.Л. Савицька, доц. Л.Ф. Товма. – Х. : НА НГУ, 2020. – 635 с.

УДК 641.78:664

ІННОВАЦІЙНІ ВЕКТОРИ РОЗВИТКУ ХОЛОДИЛЬНОЇ ТА КЛІМАТИЧНОЇ ТЕХНІКИ: ВІД ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ І СТІЙКИХ СИСТЕМ

Якушенко Є. М., к.т.н., доц., e-mail: papelats@ukr.net
Семенюк Д. П., к.т.н., проф., e-mail: dmitriy.semeniuk@gmail.com
Петренко О. В., к.т.н., доц., e-mail: petrenkoolena23@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Ринок холодильного та кліматичного обладнання (РКО) переживає період глибокої трансформації, зумовленої глобальними викликами, такими як необхідність зниження енергоспоживання, посилення екологічних норм та стрімкий розвиток цифрових технологій. Галузь, що традиційно є критично важливою для забезпечення продовольчої безпеки, збереження лікарських засобів та підтримки комфортних умов у різних секторах (від роздрібної торгівлі та логістики до охорони здоров'я та промисловості), виходить на новий рівень розвитку. У світлі зростаючої світової уваги до питань сталого розвитку та декарбонізації РКО займає стратегічне місце у формуванні «зеленої» економіки. Справжні тези націлені на аналіз ключових тенденцій, інноваційних проривів та прогнозування векторів розвитку ринку РКО у контексті викликів XXI століття.

Сучасний ринок РКО визначається декількома взаємопов'язаними тенденціями, кожна з яких істотно впливає на дизайн, виробництво та експлуатацію обладнання.

Підвищений попит на енергоефективне обладнання є головною рушійною силою ринку. Це не просто економічна вимога, спрямована на зниження експлуатаційних витрат, а й фундаментальну відповідь на глобальну зміну клімату. З наукового погляду підвищення енергоефективності в холодильних циклах досягається через:

• Оптимізацію термодинамічного циклу.
• Підвищення ефективності компонентів.
• Зниження теплових втрат.

Законодавче регулювання (наприклад, F-Gas Regulation у ЄС, стандарти DOE у США) продовжує посилювати вимоги до мінімального енергетичного показника обладнання, що стимулює R&D активність у цьому напрямку.

Глобальний перехід від гідрофторвуглеців (ГФУ), що мають високий потенціал глобального потепління (ПГП/GWP), до природних холодоагентів – (R-744), пропану (R-290), ізобутану (R-600a) та аміаку (R-717) – стає домінуючим рішенням у комерційному холоді, вимагаючи, однак, складного інженерного підходу, пов'язаного з високими робочими тисками та необхідністю використання газових охолоджувачів. Пропан і ізобутан, маючи вкрай низький ПГП, активно впроваджуються в побутове та легке комерційне обладнання, незважаючи на їх класифікацію як горючих холодоагентів, що потребує дотримання суворих норм безпеки та обмеження заправки. Аміак зберігає свої позиції у великому промисловому холоді завдяки високій ефективності, незважаючи на токсичність. Цей перехід не лише вирішує екологічні проблеми, а й стимулює розробку нових компонентів, стійких до корозії та високих тисків.

Зростання інтересу до інтегрованих систем управління холодом – це відповідь на потребу в автоматизації, прогнозованості та предиктивному обслуговуванні. Використання систем диспетчеризації та управління будівлями (Building Management Systems, BMS) у комбінації з хмарними платформами дозволяє:

• Оптимізувати продуктивність у реальному часі: адаптивне керування, що ґрунтується на зовнішніх та внутрішніх параметрах (температура навколишнього середовища, рівень завантаження, ціни на електроенергію).

• Предиктивне обслуговування (PdM): моніторинг вібрації компресора, аналіз масла, відстеження аномалій у робочих параметрах (температура нагнітання/всмоктування, перегрів/переохолодження) для прогнозування відмов та мінімізації незапланованих простоїв.

• Управління енергоспоживанням: участь холодильних систем у програмах управління попитом (Demand Response) з боку енергомереж.

Інновації є каталізатором трансформації ринку, забезпечуючи як підвищення ефективності, а й поява принципово нових рішень.

Штучний інтелект (ШІ) та Машинне навчання (МН) в оптимізації циклів. Впровадження ШІ та МН переводить управління холодом з реактивного у проактивний режим. Алгоритми МН здатні аналізувати великі масиви даних, зібраних з датчиків (Big Data), і виявляти складні, нелінійні залежності, недоступні традиційним PID-регуляторам.

Зростає інтерес до гібридних холодильних систем, що інтегрують поновлювані джерела енергії, зокрема сонячні фотоелектричні панелі. Це особливо актуально для віддалених та автономних систем (наприклад, у країнах, що розвиваються, або в транспортному холоді). Розвиваються також абсорбційні холодильні системи, що використовують надмірне тепло від промислових процесів або сонячні колектори, що дозволяє ефективно утилізувати енергію.

Майбутнє ринку РКО обіцяє бути динамічним та багатовимірним.

Збільшення вимог до точності та надійності в сегментах медичного та фармацевтичного холоду (Ultra Low Temperature, ULT) стимулюватиме подальші інновації. Розробка холодильників для зберігання вакцин, біологічних матеріалів та органів вимагає контролю температури з точністю до часток градуса Цельсія та виняткової надійності (системи резервування, моніторинг 24/7). Зростання біофармацевтичної галузі та персоналізованої медицини зробить цей сегмент одним із найшвидше зростаючих.

Концепція «від ферми до столу» вимагає наскрізного моніторингу та управління умовами зберігання. Впровадження технологій IoT (Internet of Things), блокчейна для відстеження походження та умов зберігання, а також автономних транспортних холодильних установок (рефрижераторів) з інтегрованим ШІ стане стандартом. Це забезпечить мінімізацію втрат продуктів (Food Loss) та підвищення безпеки.

Виробники будуть зміщувати акцент на модульні, Plug & Play рішення, які можуть бути швидко встановлені, масштабовані та адаптовані до мінливих потреб бізнесу (наприклад, розширення торгової площі або зміна асортименту). Це підвищить гнучкість інвестицій для кінцевих користувачів.

Ринок холодильного та кліматичного обладнання знаходиться в точці біфуркації, де традиційні підходи поступаються місцем інтелектуальним, стійким і високоефективним рішенням. Головними драйверами змін залишаються глобальний екологічний імператив (перехід на холодоагенти з низьким ПГП) та економічна доцільність (підвищення енергоефективності). Для учасників ринку – від виробників компонентів до експлуатуючих організацій – успіх визначатиметься їхньою здатністю до швидкої адаптації, інвестування у цифрові технології (ШІ/МН, IoT) та інтеграції принципів сталого розвитку в основу своєї діяльності. Тільки через глибоку технологічну інновацію галузь зможе виконати свою ключову місію із забезпечення збереження ресурсів та комфорту за одночасної мінімізації впливу на навколишнє середовище. Прогнозоване зростання ринку буде стійким, з акцентом на "зелені" технології та інтелектуальне управління.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Проблеми техногенної та продовольчої безпеки – URL: https://www.nio-holod.com.ua/2007-3-2.pdf.

2. Семенюк Д. П. Технологічне холодильне обладнання [Електронний ресурс] : навч. посібник : у 2 ч. Ч. 1 / Д. П. Семенюк, О. В. Петренко. – Електрон. дані. – Х. : ХДУХТ, 2018. – С. 241.

3. Забезпечення холодом об’єктів в умовах відсутності стаціонарного енергопостачання / Є.М. Якушенко, В.О. Потапов, Д.П. Семенюк, О.В. Петренко // ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: тренди енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. Н.Л. Савицька, доц. Л.Ф. Товма. – Х. : НА НГУ, 2020. – 635 с.

УДК 697.952; 004.9

СИСТЕМА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ ПОБУТОВИХ ПРИМІЩЕНЬ НА ОСНОВІ ФАНКОЙЛА

Яцьковський Т. Є., магістр, e-mail: tarasyatskovskiy@gmail.com
Горященко С. Л., к.т.н., доц., e-mail: horiashchenko@khmnu.edu.ua
Хмельницький національний університет

Анотація. *На основі розробленого фанкойла для нагріву та опалення приміщень було проведено експериментальні дослідження його роботи. Отримано регресійні моделі фанкойла та порівняно з теоретичними даними.*

Ключові слова: *опалення, система, нагрів.*

Вступ. Створення системи, яку можна застосовувати у побутових приміщеннях для обігріву потребує комплексного підходу як до аналізу його роботи так і до процесів нагріву приміщення. Тому розробка системи для опалення побутових приміщень на основі фанкойла є актуальною темою.

Постановка проблеми. Одним із доступних способів впровадження енергозберігаючих технологій у складі централізованих вентиляційних агрегатів при проєктуванні нових або реконструкції існуючих систем вентиляції є встановлення рекуперативного теплообмінника. Для цього пропонується розробити конструкцію фанкойла, який можна буде розташувати як на підлозі, так і на стіні, забезпечуючи при цьому функції нагрівання та охолодження повітря. Принцип роботи пристрою наступний. Вода, яка виступає як теплоносій, протікає через теплообмінник. Вентилятор проганяє повітря крізь трубки теплообмінника. Точки подачі та відбору води з'єднані гнучкими шлангами із системою нагрівання чи охолодження води. Це може бути бойлер, теплоакумулятор чи просто система гарячого водопостачання. Для охолодження вода може додатково проходити через холодильну машину.

Рисунок 1 – Загальний вигляд конструкції фанкойла

Було прийнято рішення провести дослідження із застосуванням математичних методів планування та аналізу експерименту, що дозволяє уникнути недоліків, характерних для однофакторних методів. У зв’язку з цим експеримент вирішили організувати на основі некомпозиційного рототабельного планування другого порядку. Обробка отриманих даних дозволила встановити залежність параметра оптимізації (температури) від факторів, зокрема площі теплообмінника, часу нагрівання і об’єму речовини. У результаті проведених експериментів були побудовані рівняння регресії для фанкойла:

$$T_{f1}(S,t,v) = 30.1 + 12.15p + 27.85t - 1.05v - 9.67pt - 37.05vt - \\ -13.45pv - 20.52p^2 + 90.19t^2 + 14.46v^2 , \quad (1)$$

де $S = \dfrac{S - 128000}{72000}$ – приведене значення площі теплообмінника;

$t = \frac{T-30}{15}$ – приведене значення часу нагрівання;

$v = \frac{V_p - 0.0000015}{0.0000005}$ – приведене значення кількості рідини.

Отримані рівняння дозволяють описати процес зміни температури з урахуванням всіх трьох факторів.

На рис. 2 представлено графік залежності нагрівання теплоносія, з якого бачимо, що збільшення кількості рідини та часу веде до скорочення часу нагрівання, яке обумовлено фактичною площею теплообмінника. Таким чином, аналітична модель з достатньою для розрахунків точністю описує процес нагрівання теплоносія в фанкойлі. Це дозволяє використовувати запропоновану в роботі модель для розрахунків конструктивних та технологічних параметрів побутового фанкойла.

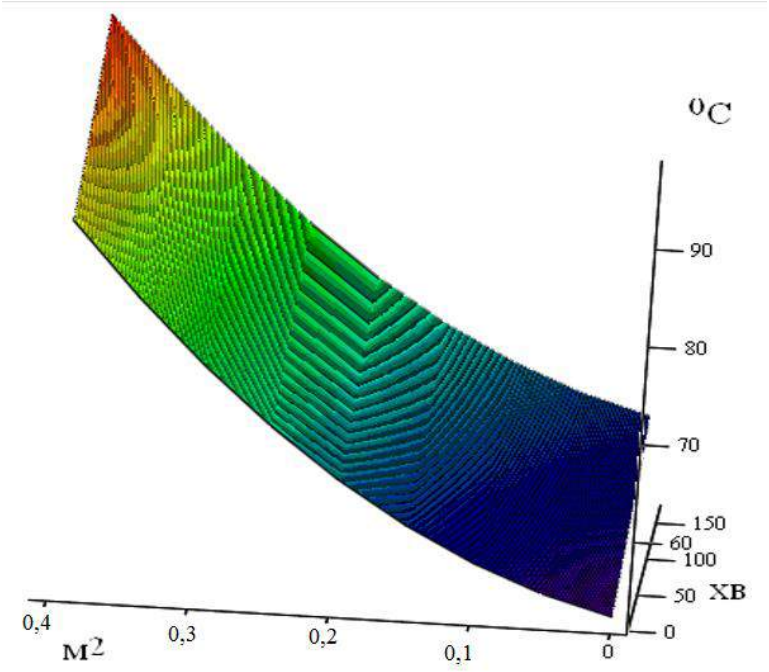


Рисунок 2 – Графік залежності нагрівання теплоносія від часу нагріву (хв) та площі теплообмінника (м^2)

Отримані залежності розподілу температури в теплообміннику та пристрої будуть корисні під час вибору площі теплообмінника в залежності від площі побутових приміщень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. M. P. Andersen, G. Fierro, S. Kumar, M. Chen, L. Truong, J. Kim, E. A. Arens, H. Zhang, P. Raftery, and D. E. Culler: Proc. 2nd ACM Int. Conf. Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments (2015) 121. https://doi.org/10.1145/2821650.2830312.

2. Goosse, H. (2015). Climate System Dynamics and Modelling. Cambridge: Cambridge University Press.

UDC 621.564.24

STUDY OF POTENTIAL BINARY NATURAL MIXTURES OF REFRIGERANTS WITH MODERATE TEMPERATURE GLIDE BASED ON ISOBUTANE

Zaruba H., PhD student, e-mail: hlib.zaruba@gmail.com
Khmelniuk M., D. Sc., Prof., e-mail: hmel_m@ukr.net
Odesa National University of Technology

Relevance of the study. The modern HVACR market is gradually moving away from synthetic fluorinated refrigerants, not only because of their high GWP, but also because of environmental and toxicological risks. Regulation (EU) 2024/573 provides for a phased ban on F-gases (including HFCs and HFOs) in new equipment, effectively leading to a complete transition to environmentally friendly alternatives. An additional factor of pressure has been the issue of PFAS ("forever chemicals"), which include many fluorinated agents — they are characterized by persistence, bioaccumulation, and environmental harm. All this reinforces the need to transition to natural, fluorine-free refrigerants [1].

One of the most promising solutions is considered to be isobutane (R600a) and its mixtures with other natural agents. It has an extremely low GWP (about 3), high energy efficiency, and good thermodynamic properties. Thus, in a study by Kang G.H. et al., mixtures of isobutane and propane demonstrated high potential for energy efficiency and productivity [2]. Therefore, research into mixtures of isobutane with natural refrigerants is a relevant area for the creation of environmentally friendly and energy-efficient HVACR systems.

Research objective. To obtain potential candidates for an energy-efficient binary refrigerant mixture with moderate temperature glide based on isobutane for further modeling of their behavior in refrigeration cycles.

Main research materials. The properties of binary refrigerant mixtures were simulated using the Python 3.11 programming language in the PyCharm 2025 integrated development environment (version 2.1.1). The NIST Refprop 10.0 [3] library was used as the source of property data, which contains verified reference values for the thermodynamic and transport properties of both pure substances and their mixtures.

To evaluate the temperature glide, the temperature difference between the vapor and liquid saturation points at a pressure of 101,325 Pa (atmospheric) was calculated. This pressure was chosen as a standard and convenient reference value. It should be noted that the glide values obtained under these conditions will be slightly higher than those obtained under actual refrigeration system operating conditions. The reason is that as the pressure increases, the compositions of the liquid and vapor phases become closer, and pressure losses occur in the system, which further reduces the actual glide. In the evaporator, this effect is amplified by the fact that the actual boiling process is shorter than the complete isobaric line in the saturated state region.

Calculations were performed for various mass fractions of components in increments of 0.5%, which allowed for a detailed assessment of the effect of composition on temperature glide. Of the 36 natural substances represented in the Refprop 10.0 database, those that are corrosive and incompatible with the equipment were excluded, as well as those that do not provide a glide of < 10 K at any component ratio. The remaining refrigerants were included in Table 1, which lists the following parameters:

- Name of refrigerants (Name);
- Molar mass of the substance (M);
- Critical pressure (Pc);
- Critical temperature (tc);
- Boiling point at atmospheric pressure (NBP);
- Percentage mass fractions of the component in the mixture at which the temperature glide does not exceed 10 K (x);
- Safety class of the refrigerant according to ASHRAE 34 classification (Safety group).

Table 1 – Comparative properties of refrigerants selected for analysis

№	Name	M, g/mol	Pc, MPa	tc, °C	NBP, °C	x, %	Safety group
0	Isobutane	58.122	3.629	134.66	-11.75	-	A3
1	2,3-Dimethylbutane	86.175	3.161	227.45	58.03	0 - 6 / 96.5 - 100	A3
2	3-Methylpentane	86.175	3.184	232.85	63.23	0 - 4.5 / 97.5 - 100	A3
3	Benzene	78.112	4.907	288.87	80.07	0 - 2.5 / 99 - 100	B3
4	Butane	58.122	3.796	151.98	-0.49	0 - 100	A3
5	Carbon dioxide	44.01	7.377	30.98	-78.5*	0 - 0.5 / 97.5 - 100	A1
6	Ethane	30.069	4.872	32.17	-88.58	0 - 2 / 98.5 - 100	A3
7	Ethylene	28.054	5.042	9.2	-103.77	0 - 1 / 99.5 - 100	A3
8	Heptane	100.202	2.736	267.05	98.4	0 - 1 / 99.5 - 100	A3
9	Hexane	86.175	3.044	234.67	68.72	0 - 3.5 / 98 - 100	B3
10	Isohexane	86.175	3.04	224.55	60.21	0 - 5.5 / 97 - 100	B3
11	Isooctane	114.229	2.572	270.85	99.21	0 - 1 / 99.5 - 100	B3
12	Isopentane	72.149	3.378	187.2	27.83	0 - 27.5 / 79.5 - 100	A3
13	Neohexane	86.175	3.138	216.85	49.7	0 - 8.5 / 95 - 100	A3
14	Neopentane	72.149	3.196	160.59	9.51	0 - 100	A3
15	Octane	114.229	2.484	295.59	125.64	0 - 0.5 / 100	A3
16	Pentane	72.149	3.368	196.55	36.06	0 - 15.5 / 89 - 100	A3
17	Propane	44.096	4.251	96.74	-42.11	0 - 100	A3
18	Propylene	42.08	4.555	91.06	-47.62	0 - 100	A3
19	Toluene	92.138	4.126	318.6	110.6	0 - 0.5 / 99.5 - 100	B3
20	Water	18.015	22.064	373.95	100	0 / 96 - 100	A1

*Sublimation temperature

As can be seen from the table, most of the refrigerants studied are highly flammable hydrocarbons. From a safety perspective, it is more rational to use mixtures of isobutane with non-flammable substances such as CO_2 or water. However, the mass fractions of these components at which the glide does not exceed 10 K are outside the acceptable range. The small areas of the composition where the condition is met are too limited to significantly reduce the flammability of the mixture, so their practical use is impractical.

Among combustible substances, four refrigerants – butane, neopentane, propane, and propylene – maintain a glide below 10 K at any mass ratio of the components. In addition, three compounds – isopentane, neohhexane, and pentane – have a limited range of acceptable proportions, which still allows them to be considered for further study. The remaining substances demonstrate an extremely narrow range of molar proportions corresponding to the condition of moderate glide and are therefore of minimal practical interest.

Conclusion. The simulation showed that among the natural substances available in the Refprop 10.0 database, only a limited number of compounds form binary mixtures with isobutane with a moderate temperature glide (< 10 K). The most promising in terms of thermodynamic properties and technological feasibility were mixtures of isobutane with butane, neopentane, propane, and propylene, which maintain a low glide at any mass ratio. Mixtures with isopentane, neohhexane, and pentane can also be considered as potential candidates, although their stable glide range is limited. The results obtained form the basis for further thermodynamic analysis and evaluation of the energy efficiency of these mixtures in refrigeration cycles.

REFERENCES

1. Regulation - EU - 2024/573 // EUR-Lex: [Website]. Luxembourg, 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj (date of access: 21.10.2025).

2. Kang G. H, Na S.-I., Kim M.S Reasonable performance comparison for a refrigeration system using different refrigerants: Case with propane and isobutane mixtures with several compositions // International Journal of Refrigeration. 2022. V. 135. P. 41-50.

3. REFPROP // National Institute of Standards and Technology: [Website]. Gettysburg, 2024. URL: https://www.nist.gov/srd/refprop (date of access: 21.10.2025).

СЕКЦІЯ 6. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5

АРХІТЕКТУРА ПЛІС-КОНТРОЛЕРА ПАРАЛЕЛЬНОЇ ДІЇ МОДУЛЬНОГО ТИПУ

Бовчалюк С. Я., к.т.н., доц., доц. каф. ЕОМ, e-mail: stanislav.bovchaliuk@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки
Бовчалюк Н. І., асист. кафедри АКІТ, e-mail: natabov@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Публікації, присвячені інформаційній технології паралельного логічного керування та її складовим (паралельним керуючим пристроям, мові й технології програмування), свідчать про її перспективність для систем керування об'єктами критичної дії. Водночас застосування цієї технології у промисловому секторі обмежується недостатньою функціональністю, що вимагає адаптації структури контролерів під конкретні задачі. До можливих удосконалень належать інтеграція нечіткого логічного висновку, таймерів і лічильників у структуру класичного автомата паралельної дії. Отже, створення «гнучкої» структури таких автоматів спростить розробку контролерів із потрібними функціональними можливостями.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування побудови «гнучкої» структури логічних керуючих автоматів паралельної дії, формулювання концепції «модульної архітектури» та реалізація перспективний ЛКА ПД відповідно до неї.

Основні матеріали досліджень. Базовою, для побудови сучасних керуючих пристроїв паралельної дії, можна уважати структуру, з детальним описом роботи якої можна ознайомитись в [1]. Саме її покладено в основу промислових зразків ПЛІС-контролерів паралельної дії на кристалах компанії Intel-Altera [2]. Також результатом її розвитку є логічні керуючі автомати з розширеними функціональними можливостями [3]. Детальний аналіз розглянутих структур ЛКА ПД, а також перспектив їх розвитку, зазначених у [4], зокрема щодо уведення лічильників та елементів виконання арифметичних операцій, показує, що основна логіка роботи автомата полягає у формуванні двох сигналів: «А» та «+1». Незалежно від того, який блок генерує ці сигнали, рівняння, що їх описують, лише трансформуються ,тобто ускладнюються, переходячи від базових форм до більш складних та розширених, які містять більшу кількість змінних та умов переривань. Отже сформулюємо думку, що є суттю концепції модульної архітектури керуючих пристроїв паралельної дії: «перспективна архітектура ЛКА ПД має передбачати можливості «гнучкої» зміни внутрішньої його структури за рахунок додавання або виключення блоків, що забезпечуватимуть необхідний рівень функціональності, без внесення змін до базових блоків, тобто його «ядра»».

У запропонованій структурі керуючого автомата, створеного відповідно до вказаної концепції і названої «модульним логічним керуючим автоматом паралельної дії» (МЛКА ПД), серед блоків визначення наступного етапу – БВНЕ (тобто блоків, що приймають участь у формуванні сигналів «А» і «+1») виділяють чотири основні: БПС, БПП, БПК і БПЗК. Їхнє призначення та функції залишилися незмінними для класичного ЛКА ПД. Новими блоками вибору наступного етапу є: БВТ – блок внутрішніх таймерів, програмованих користувачем; БЛ – блок лічильників, призначений для підрахунку внутрішніх або зовнішніх сигналів; БРАО – блок реалізації арифметичних операцій, що виконує арифметичні дії з числовими даними. До нової структури МЛКА ПД також може додаватися необмежена кількість додаткових блоків БВНЕ, що, як і основні, підключаються до внутрішніх шин: ШЕ – шина еквівалентностей, передає до БЛК сигнал про виконання умови, необхідної для переходу на наступний крок підпрограми («+1»); ШП – шина переривань, передає сигнал про виконання умови для переходу до першого рядка іншої підпрограми («А»); ШЗ – шина внутрішніх змінних і констант, забезпечує обмін даними між блоками та блоком пам'яті внутрішніх

змінних (БПВЗ), який зберігає ці дані постійно або тимчасово.

Варто зазначити, що блоки БВНЕ можуть підключатися як до всіх трьох шин, так і лише до однієї з них. Наприклад, БПС з'єднаний тільки з шиною ШЗ. Завдяки цьому новому зв'язку суттєво розширюються можливості формування умов переходу до наступного кроку поточної підпрограми, оскільки з'являється можливість оперативної зміни умов, записаних у БПС, безпосередньо під час роботи. Також вкажемо, що функціональні можливості блоку логічного керування (БЛК) у порівнянні з базовою структурою [1] суттєво розширилися. Зокрема, через можливість одночасної появи кількох активних сигналів на шині ШП виникає потреба у чіткому визначенні їх пріоритетів, щоб встановити, до якої підпрограми має здійснюватися перехід на наступному етапі роботи системи.

Окрему увагу варто приділити особливостям реалізації блоку БРАО у перспективних проєктах МЛКА ПД. Необхідною умовою його інтеграції до систем керування паралельної дії є паралельний принцип роботи – виконання арифметичних операцій за один такт дискретного автоматного часу. Водночас арифметичні операції за своєю природою виконуються послідовно, наприклад через перенесення розрядів під час додавання, що створює принципову суперечність, яку неможливо усунути простим удосконаленням структури ЛКА ПД. Одним із найперспективніших способів подолання цієї проблеми, на думку авторів, є використання системи залишкових класів (СЗК) або числової системи залишків (Residue Number System, RNS). У роботі згадується про спроби застосування СЗК у контексті побудови систем керування паралельної дії, однак на сьогодні відсутні реальні інженерні реалізації чи теоретичні моделі керуючих автоматів паралельної дії, що містять обчислювальні елементи на основі СЗК.

Очевидно, що запропонована структура МЛКА ПД дає змогу створювати керуючі пристрої паралельної дії з будь-якою функціональністю в межах визначених можливостей. Так, використання лише чотирьох стандартних блоків БВНЕ (БПС, БПП, БПК і БПЗК) забезпечує структуру класичного ЛКА ПД, а додавання блоків БВТ і БПВЗ формує систему, функціонально еквівалентну тій, що показана в [1]. Очевидно, що запропонована концепція «модульності» відкриває можливість створення контролерів паралельної дії з новими функціями, які можуть бути розроблені в майбутньому.

Висновок. У результаті досліджень усунуто недолік керуючих пристроїв з паралельною архітектурою, пов'язаний із «жорсткою логікою» та обмеженим використанням потенціалу ПЛІС для створення гнучких систем керування. Запропоновано концепцію «модульної архітектури», що забезпечує побудову гнучких логічних керуючих автоматів, на її основі синтезовано модульний керуючий автомат, здатний реалізовувати необхідну функціональність залежно від конкретних задач системи керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бовчалюк С. Я. Вдосконалення математичної моделі та архітектури логічних керуючих автоматів паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. О. Фурман // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №3(59). – С. 72–76.

2. Бовчалюк С. Я. Технічна реалізація промислового зразка ПЛІС-контролера паралельної дії / С. Я. Бовчалюк, І. О. Фурман [та ін.] // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, вип. 87. – Харків, 2009. – С. 126–127.

3. Бовчалюк С. Я. Розвиток моделі та структури керуючих пристроїв з паралельною архітектурою / С. Я. Бовчалюк, Я. В. Гаращенко, Б. М. Коломоєць [та ін.] // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Випуск 2 (76). – С. 64-66. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.064

4. Бовчалюк С. Я. Визначення напрямків розвитку керуючих пристроїв з паралельною архітектурою на базі ПЛІС / С. Я. Бовчалюк, О. М. Піскарьов, С. С. Радченко, [та ін.] // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2023. – Випуск 1 (71). – С. 69-72 DOI: 10.26906/SUNZ.2023.1.069.

УДК 004.9:629.7

АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНЖЕНЕРНО-АВІАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Варваров В. В., к.т.н., e-mail: varvarovv@ukr.net
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Актуальність дослідження. Сучасна авіаційна галузь характеризується високим рівнем технологічної складності, що потребує ефективного управління технічним станом повітряних суден і наземної інфраструктури. Автоматизація процесів інженерно-авіаційного забезпечення (ІАЗ) є ключовою умовою безпечної, надійної та економічно ефективної експлуатації авіаційної техніки [1]. Розвиток комп'ютерних технологій дозволив створити цілісні системи автоматизованого контролю, управління, обліку та діагностики. Впровадження таких рішень забезпечує зниження людського чинника, підвищення точності технічних розрахунків, швидке реагування на відхилення в роботі систем та прогнозування технічного ресурсу агрегатів [2].

Метою дослідження є аналіз сучасного програмного забезпечення та автоматизованих систем, що використовуються у сфері інженерно-авіаційного забезпечення для розробки, контролю, управління та діагностики технічного стану авіаційних систем.

Основні матеріали досліджень. Інженерно-авіаційне забезпечення (ІАЗ) є комплексом організаційно-технічних заходів, спрямованих на підтримання льотної придатності повітряних суден, справності авіаційного обладнання, забезпечення безперервності польотного процесу тощо. Вимоги до ефективності, безпеки й економічності авіаційних перевезень зумовлюють необхідність широкого впровадження автоматизованих систем контролю, управління й діагностики технічного стану авіаційних систем [1]. Одним із найважливіших напрямів автоматизації ІАЗ є цифровізація процесу проєктування та експлуатації авіаційних агрегатів. Використання систем автоматизованого проєктування (CAD/CAM/CAE) забезпечує інтеграцію всіх етапів життєвого циклу техніки – від конструкторської розробки до технічного обслуговування. Сучасні програмні комплекси CATIA, Siemens NX, SolidWorks і Autodesk Inventor дають змогу створювати високоточні тривимірні моделі літальних апаратів, здійснювати віртуальну перевірку міцності конструкцій, аналізувати аеродинамічні характеристики й моделювати процеси навантаження на елементи корпусу [2].

Завдяки застосуванню інтегрованих PLM-платформ (Product Lifecycle Management), інженери мають можливість об'єднувати конструкторські, технологічні та експлуатаційні дані в єдиному інформаційному середовищі, що сприяє мінімізації помилок і дублювання інформації. Серед найпоширеніших інтегрованих PLM-платформ, що застосовуються у світовій авіаційній промисловості, варто відзначити Siemens Teamcenter, Dassault Systèmes ENOVIA, PTC Windchill, Autodesk Fusion Lifecycle, SAP PLM та Aras Innovator. Зазначені системи забезпечують наскрізне управління даними про виріб, інтеграцію конструкторських і технологічних процесів, підтримку цифрових двійників і спільну роботу інженерів у межах єдиного інформаційного простору [2; 3]. В авіаційних компаніях, зокрема Airbus і Rolls-Royce, для координації роботи інженерних команд активно використовується Siemens Teamcenter, яка забезпечує централізоване управління конструкторською документацією, змінами у проєкті, технологічними процесами й ресурсами підприємства. У програмах розробки літаків Airbus A350 і Falcon Jet використовується Dassault Systèmes ENOVIA – частина екосистеми 3DEXPERIENCE, що інтегрується з CAD-системою CATIA, підтримує колективну роботу над великими проєктами, моделювання процесів життєвого циклу, управління вимогами й аналіз змін. Платформа для управління інженерними даними PTC Windchill підтримує моделювання цифрового двійника (Digital Twin) і повний цикл від розробки до технічного обслуговування, а дозволяє відстежувати версії виробів, синхронізувати зміни між CAD-модулями та ERP-системами.

Важливе місце у структурі автоматизації ІАЗ посідають системи технічного обслуговування та ремонту, які забезпечують ефективне управління технічними процесами на всіх етапах експлуатації повітряного судна. Однією з найпоширеніших систем такого типу є AMOS (Swiss Aviation Software), що використовується провідними авіакомпаніями світу [3]. Вона дозволяє здійснювати планування регламентних робіт, контроль технічного стану агрегатів, ведення електронних журналів обслуговування, управління запасами матеріалів і комплектуючих. Завдяки інтеграції з базами даних виробників авіатехніки система AMOS забезпечує автоматичне оновлення технічних бюлетенів, рекомендацій та інструкцій, що підвищує оперативність прийняття рішень і знижує ризик експлуатаційних помилок.

Системи моніторингу технічного стану обладнання (Condition Monitoring Systems) реалізуються як Aircraft Health Monitoring Systems (AHMS) – вбудовані комплекси, які в режимі реального часу відстежують параметри роботи двигунів, паливних систем, гідравліки, електроніки, температурного режиму тощо [1]. Автоматизація діагностики сприяє скороченню витрат на ремонт і запобігає виникненню критичних відмов у польоті. Значну роль у підвищенні ефективності ІАЗ відіграють інтелектуальні системи управління процесами, які базуються на технологіях штучного інтелекту, машинного навчання та великих даних (Big Data). Системи, подібні до Boeing AnalytX або Airbus Skywise, аналізують мільйони параметрів, що надходять із бортових систем літаків, і на основі алгоритмів прогнозування визначають імовірність виникнення технічних проблем [2; 3]. Наприклад, система Skywise дозволяє виявити тенденцію до несправності гідросистеми за кілька десятків годин до її фактичного прояву, що дає технічним службам змогу заздалегідь підготувати необхідні запчастини та скоротити час простою літака.

У межах наземного забезпечення автоматизація охоплює управління запасами, контроль палива, облік витратних матеріалів, планування робіт технічного персоналу й управління транспортними засобами на аеродромі. Програмні рішення типу Rusada ENVISION, TRAX Maintenance та RAMCO Aviation Suite об’єднують усі ці функції в єдину цифрову екосистему, що дозволяє підвищити продуктивність праці та мінімізувати вплив людського чинника. Такі системи використовуються не лише на великих міжнародних аеропортах, але й на регіональних авіаційних підприємствах, де важливим є поєднання економічності, надійності та простоти експлуатації. Перехід до цифрових моделей, інтеграція даних з різних систем і застосування аналітичних алгоритмів дозволяють здійснювати повний контроль за станом техніки в режимі реального часу. Це не лише підвищує безпеку польотів, але й забезпечує прозорість технічної експлуатації, оптимізує витрати та сприяє переходу до концепції «розумного авіаційного обслуговування» (Smart Maintenance) [1; 3].

Висновок. Автоматизація інженерно-авіаційного забезпечення є важливим напрямом розвитку сучасної авіаційної інфраструктури. Використання спеціалізованих програмних рішень, таких як AMOS, CATIA, Siemens NX, ENVISION або Skywise, забезпечує інтеграцію процесів проєктування, діагностики та технічного обслуговування у єдиному цифровому середовищі. Такі технології сприяють підвищенню надійності повітряних суден, оптимізації витрат і скороченню часу простою техніки. Подальший розвиток галузі пов’язаний із розширенням використання штучного інтелекту, машинного навчання та хмарних обчислень, що забезпечить новий рівень ефективності у сфері авіаційного обслуговування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Boeing AnalytX Platform. Predictive Maintenance and Data Analytics Solutions. – Boeing, 2023. – URL: https://www.boeing.com/analytx/

2. Swiss Aviation Software. AMOS Maintenance Management System. – Basel: SWISS-AS, 2022. – 68 p.

3. Савчук М. О. Автоматизовані системи технічного обслуговування авіаційної техніки: сучасний стан і перспективи розвитку. – Київ: НАУ, 2021. – 224 с.

УДК 004.8:004.942

РОЗРОБКА РОЗПОДІЛЕНОЇ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ТА СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ: АРХІТЕКТУРНИЙ СИНТЕЗ І СУЧАСНІ ПІДХОДИ

Гриб К. О., магістрант, e-mail: dabfan2021@gmail.com,
Сірик Д. М., магістрант, e-mail: kiradanil40@gmail.com,
Піскарьов О. М., к.т.н., доц., доц. каф. АКІТ, e-mail: post@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У сучасних виробничих процесах важливою задачею є забезпечення безпечного й надійного доступу до інформації з різних точок та контролю системи навіть у випадку виходу з ладу окремих компонентів. Розподілені бази даних дозволяють підвищити продуктивність роботи системи за рахунок розпаралелення процесів зберігання, обробки та передачі даних [1], а також забезпечують локальну автономію для кожного вузла системи. Завдяки механізмам фрагментації, реплікації та шардування можливо розміщати інформацію на великій кількості серверів, що спрощує масштабування, підтримку та адміністрування великої інфраструктури. Потреба у віддаленому моніторингу зумовлена зростанням числа об'єктів, які функціонують поза межами центрального керуючого пункту, що вимагає розроблення сервісів для збору, фільтрації та візуалізації інформації у реальному часі.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування ефективних підходів до створення розподіленої бази даних для автоматизованої системи керування виробництвом, а також автоматизованої системи віддаленого моніторингу. Це передбачає забезпечення масштабованості, надійності й безпеки зберігання та обробки великих обсягів даних у режимі реального часу, а також створення інтегрованої інформаційної інфраструктури, здатної оперативно збирати, обробляти та аналізувати дані з віддалених об’єктів і виробничих ділянок. Водночас мета полягає у підвищенні продуктивності, гнучкості та ефективності автоматизованих систем за рахунок інтеграції розподіленої бази даних із системою віддаленого моніторингу.

Основні матеріали досліджень. Сучасні розподілені бази даних формуються на основі мережі логічно зв’язаних вузлів, кожен з яких виконує обробку локальних та глобальних запитів, підтримує реплікацію даних, забезпечує прозорість для кінцевого користувача, а також гарантує безперервний доступ до даних навіть при зміні географічної або логічної структури інфраструктури. Архітектура таких систем може ґрунтуватися на різних підходах: це клієнт-серверна модель, peer-to-peer архітектура або мультисерверні конфігурації, що дозволяють підвищити як гнучкість, так і надійність функціонування всієї системи. Основні архітектурні принципи — це фрагментація, тобто розділення даних за типом чи функцією між вузлами, що суттєво підвищує ефективність пошуку й оновлення інформації; реплікація, яка створює копії даних для підвищення відмовостійкості та оперативного відновлення в разі помилок; а також шардування [2], що дозволяє розподіляти навантаження між фізичними ресурсами мережі, сприяючи більш рівномірному розподілу інформації, оптимізації її обробки та збереженню.

Водночас автоматизовані системи віддаленого моніторингу складаються з великої кількості сенсорів, пристроїв збору даних, комунікаційних шлюзів і каналів зв’язку. Зібрані дані передаються у центральний або розподілений вузол бази даних, де здійснюється агрегація, фільтрація, нормалізація і первинний аналіз інформації для подальшої інтелектуальної обробки. Розподілена структура бази даних дає змогу забезпечити оперативне реагування на зміну параметрів виробничого середовища чи обладнання, а також своєчасно інформувати операторів або автоматичні виконавці про потенційні відхилення [3]. Використання сучасних технологій дозволяє реалізувати гнучкі API, забезпечити багаторівневу авторизацію, інтегрувати зовнішні сервіси аналітики, прогнозування та машинного навчання. Це також сприяє забезпеченню підвищеного рівня захисту даних як під час їх передачі, так і при збереженні у базі.

Комплексність і універсальність підходу проявляється у здатності розподіленої бази даних і системи віддаленого моніторингу інтегруватися з корпоративними платформами типу ERP та MES, а також мати модульний дизайн, який дозволяє підтримувати роботу з різноманітними виробничими протоколами, регламентами та стандартами. Такі архітектурні рішення забезпечують можливість додавання нових функцій чи модулів без потреби глобальної перебудови всієї системи, швидке масштабування інфраструктури відповідно до змін бізнес-процесів чи технічних вимог, а також суттєве підсилення відмовостійкості завдяки автономності окремих вузлів, сервісів і модулів, що дозволяє підтримувати стабільну роботу навіть при часткових збоях чи оновленнях.

Сучасні дослідження в області розробки розподілених баз даних постійно зосереджені на підвищенні продуктивності, надійності та безпеки систем. Зокрема, одним із перспективних напрямків є використання технологій blockchain для забезпечення незмінності та прозорості даних у розподіленій системі [4]. Це дозволяє створювати довірчі середовища без необхідності централізованого контролю, що особливо актуально для великих виробничих систем з численними учасниками.

Інший важливий напрям — впровадження інтелектуальних алгоритмів машинного навчання для аналізу даних у реальному часі з метою прогнозування відмов обладнання та оптимізації виробничих процесів у системах віддаленого моніторингу.

Новітні впровадження включають використання платформ, що базуються на Kubernetes та Docker, для автоматичного масштабування та управління компонентами системи, а також застосування edge computing для локальної обробки даних безпосередньо на виробничих майданчиках. Це дозволяє знизити затримки передачі інформації та підвищити реактивність системи. Використання IoT пристроїв з вбудованими сенсорами та передовими комунікаційними протоколами, такими як 5G, забезпечує високу швидкість та надійність передачі даних, що робить системи віддаленого моніторингу більш ефективними та масштабованими [5].

Таким чином, інтеграція сучасних технологій у розподілені бази даних і системи віддаленого моніторингу не лише покращує їх технічні характеристики, а й забезпечує конкурентні переваги для виробничих підприємств у складних умовах цифрової трансформації

Висновок. Інтеграція розподілених баз даних у структуру автоматизованих систем керування виробництвом та віддаленого моніторингу є ключем до досягнення високої продуктивності, масштабованості і надійності сучасних виробничих комплексів. Поєднання таких технологій робить можливим створення багатофункціональних, гнучких та енергоефективних рішень для цифрових виробничих і сервісних екосистем. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розвиток інтелектуальних методів аналізу даних, підвищення автоматизації контролю й управління, а також на забезпечення кібербезпеки при роботі з розподіленими інформаційними ресурсами

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Баранов В. І., Павленко А. Б. Розподілені бази даних: архітектура та практичні аспекти / Журнал "Інформаційні технології". — 2024. — № 3. — С. 45–52.

2. Коваленко В.Ю., Левченко С. М. Інноваційні рішення у системах віддаленого моніторингу промислового обладнання / Автоматизація та управління. — 2025. — № 4. — С. 78–85.

3. Гриценко М. П., Таран В. Г. Моделі та алгоритми обробки даних у розподілених системах / Комп’ютерні науки і технології. — 2023. — № 2. — С. 112–119.

4. Єрмаков Ю. В., Петров Г. О. Впровадження блокчейн-технологій у системи управління виробництвом / Журнал “Найновіші технології і інновації”. — 2024. — № 5. — С. 33–40.

5. Опанасенко А., Воробйов І. Автоматизація та масштабування систем віддаленого моніторингу на базі хмарних технологій / Конференція “Цифрова трансформація в промисловості”. — 2025. — С. 96–104.

УДК 004.8:004.942

ІНТЕГРАЦІЯ МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ

Деркач А. Є., здобувач 1-го рівня освіти, e-mail: skrollets@gmail.com,
Баськов Д. Р., здобувач 1-го рівня освіти, e-mail: hznt0001@gmail.com,
Піскарьов О. М., к.т.н., доц., доц. каф. АКІТ, e-mail: post@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Зростання складності виробничих технологій, а також посилення екологічних й енергетичних вимог, призвели до необхідності створення автоматизованих систем керування, що здатні забезпечити високий рівень оптимізації та автономії процесів. Водночас підтримка комфортного мікроклімату стає критичним фактором для промислових, офісних та житлових приміщень, оскільки вона забезпечує не лише здоров'я і продуктивність людей, а й покращує функціонування сучасного обладнання [1]. Мікросервісна архітектура, яка вже зарекомендувала себе як одна з найперспективніших моделей розробки програмного забезпечення, дозволяє будувати розподілені системи з можливістю масштабування та модульності. Це створює нові можливості для інтеграції різних підсистем — від управління технологічними процесами до моніторингу та підтримки клімату — у єдину екосистему.

Метою дослідження є розробка сучасних принципів створення автоматизованої системи керування технологічними процесами та підтримки мікроклімату приміщення на основі мікросервісної архітектури, що забезпечить підвищення гнучкості, масштабованості, ефективності автоматизації й адаптивності систем до змін середовища та вимог користувачів.

Основні матеріали досліджень. Автоматизована система керування технологічними процесами (АСКТП) є людино-машинною системою, яка за допомогою сучасних контролерів та модулів збору даних забезпечує прояв складних алгоритмів управління, швидку реакцію на зміни параметрів, та гнучкість конфігурації [1]. Мікросервіси, які реалізовані як окремі незалежні домени функціональності (наприклад, комунікація з датчиками, обробка сигналів, візуалізація чи реалізація інтерфейсів для користувачів), суттєво підвищують рівень надійності та відмовостійкості систем — кожен сервіс працює автономно і може модернізуватися без впливу на загальну архітектуру. Інтеграція мікросервісної архітектури в АСКТП відкриває широкі можливості з розширення функціональності без суттєвого впливу на основний технологічний процес. Це означає, що додавання нових модулів або змінення окремих функцій не потребує зупинки або радикальної перебудови всієї системи. Кожен мікросервіс працює автономно, що забезпечує ізоляцію його роботи від інших компонентів системи, знижуючи ризики помилок та простоїв. Також це дозволяє підвищити надійність і відмовостійкість системи, оскільки відмова одного сервісу не паралізує роботу всієї системи [2, 3].

Оптимізація алгоритмів керування за допомогою мікросервісів формується на основі аналізу історичних даних і трендів у роботі обладнання. Завдяки розділенню функціональності на окремі сервісні модулі можна більш гнучко впроваджувати зміни, оптимізувати операції та інтегрувати сучасні методи машинного навчання і аналітики для покращення продуктивності системи. Це дозволяє досягати більш точного і адаптивного керування технологічними процесами, підвищуючи ефективність експлуатації обладнання і зменшуючи енергоспоживання [2, 3].

Комплексні системи підтримки мікроклімату приміщень базуються на використанні множини датчиків температури, вологості та концентрації $CO2$, які у реальному часі збирають інформацію та передають її до розподілених контролерів. На основі цієї інформації система автоматично регулює функціонування вентиляції, опалення, кондиціонування та освітлення, що дозволяє досягти високої точності підтримки необхідних параметрів. Впровадження мікросервісної архітектури для такої системи забезпечує модульність — це

дає змогу додавати чи змінювати окремі компоненти (наприклад, датчики, інтерфейси або підсистеми управління), інтегрувати сторонні погодні сервіси, адмініструвати і дистанційно моніторити мікроклімат у приміщенні. Особливо ефективними є рішення, які дозволяють адаптувати параметри мікроклімату відповідно до часу доби та сезону, а також інтегрувати мобільні додатки для віддаленого контролю [3].

Об'єднання АСКПТ із системами підтримки мікроклімату на єдиній мікросервісній платформі створює гнучкі та надійні рішення, що відповідають сучасним вимогам виробничих і офісних середовищ. Така інтеграція дозволяє забезпечити високий рівень масштабованості та адаптивності системи до змін зовнішніх та внутрішніх умов. Вона стає можливим завдяки використанню принципів контейнеризації та оркестрації, таких як Docker та Kubernetes, що значно підвищують ефективність управління системою. Це прагматичне рішення, яке дає змогу автоматично розподіляти навантаження між сервісами, оптимізувати використання обчислювальних ресурсів і підвищити безпеку системи, оскільки кожен мікросервіс працює ізольовано, що збільшує стійкість до помилок окремих компонент.

Мікросервісна архітектура дозволяє швидко додавати нові модулі без змін усієї системи, що пришвидшує розвиток і оновлення. Це важливо для сучасних виробничих і житлово-комунальних об'єктів із постійним удосконаленням технологій. Крім того, така архітектура підвищує стабільність: збій одного модуля не зупиняє всю систему [2, 4].

Ще однією значущою перевагою є можливість більш точного, швидкого та безперервного управління складними системами, що базується на обробці даних у реальному часі та аналізі історичних трендів. Це сприяє оптимізації алгоритмів керування, підвищенню їхньої точності й адаптивності до змін виробничої або кліматичної ситуації. Завдяки цьому легко виявляти та передбачати потенційні відмови або необхідність додаткових заходів, що підвищує загальну ефективність і безпеку системи. Отже, інтеграція автоматизованих систем керування технологічними процесами і систем підтримки мікроклімату через мікросервісну платформу значно покращує функціональні можливості, забезпечує високу стабільність та масштабованість, а також сприяє швидкому розвитку і вдосконаленню технологій у сучасних промислових і житлових об'єктах [5]. Цей підхід відповідає актуальним тенденціям цифровізації та автоматизації, що визначають майбутнє галузі.

Висновок. Інтеграція мікросервісної архітектури в системах автоматизованого керування технологічними процесами і підтримки мікроклімату приміщень відкриває нові можливості для створення ефективних, гнучких і безпечних інженерних екосистем. Завдяки їх модульності, автономності та простоті масштабування ці системи забезпечують адаптивність до змін зовнішнього середовища, зменшують експлуатаційні витрати та підвищують якість керування. Подальші дослідження слід фокусувати на розробці інтелектуальних алгоритмів керування процесами, інтеграції з прогнозними сервісами та забезпеченні енергетичної ефективності й кібербезпеки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бобух А. О. АСК ТП. Теоретичні, методологічні та інженерні основи створення і реалізації автоматизованих систем керування технологічними процесами. - Харків: ХНАМГ, 2011. - 75 с.

2. Булах Б. Мікросервісна контейнерна архітектура системи керування потоками даних // Науковий вісник ХНУРЕ. — 2021. — №4. — С. 52–58.

3. Піскарьов О. М., Абрамович Д. В., Плугін В. О. Застосування нейромереж та гібридних сховищ при створенні комп'ютерних систем. Інформаційні технології та суспільство. 2025. № 2(17). С. 141–149. DOI: https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.21

4. Підвищення ефективності автоматизації масштабування мікросервісів у системі керування контейнеризованими застосунками Kubernetes // Вісник технічних наук. — 2023. — №8. — С. 33–38.

5. Тарновецька О. Ю. Дослідження методів взаємодії між сервісами у мікросервісній архітектурі // Vernadsky Journals. — 2024. — №4. — С. 19–24.

УДК 681.5

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СВИНОКОМПЛЕКСУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Єременко А. О., студ., e-mail: eremenko.andrey.alex@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Мікроклімат у приміщеннях для вирощування свиней є одним із визначальних факторів, що впливають на інтенсивність росту тварин, ефективність використання кормів, їх здоров'я та загальну продуктивність фермерського господарства. Доведено, що відхилення температури, вологості, концентрації шкідливих газів або швидкості руху повітря від нормативних значень призводить до зниження середньодобових приростів, погіршення апетиту, збільшення захворюваності поголів'я та підвищення витрат на утримання. Саме тому створення сучасної автоматизованої системи керування мікрокліматом свинокомплексу має не лише економічне, а й технологічне значення, адже така система забезпечує оптимальні умови для розвитку тварин при мінімальних енерговитратах і максимальній стабільності процесу.

Актуальність дослідження полягає у необхідності підвищення рівня автоматизації процесів утримання свиней та переходу до інтелектуальних систем керування мікрокліматом, здатних адаптуватися до зміни зовнішніх і внутрішніх факторів. У більшості діючих свинокомплексів вентиляційні, опалювальні та зволожувальні установки функціонують у ручному або напівавтоматичному режимі, що не дозволяє забезпечити стабільність параметрів мікроклімату впродовж доби. Розроблена система усуває ці недоліки завдяки впровадженню комплексу мікропроцесорних пристроїв, здатних у реальному часі відстежувати стан середовища, виконувати аналітичну обробку даних і автоматично регулювати роботу обладнання відповідно до поточних умов.

Метою роботи є створення ефективної автоматизованої системи керування мікрокліматом свинокомплексу, що забезпечує підтримання оптимальних значень температури, вологості, вентиляції та чистоти повітря, враховуючи технологічні вимоги до різних вікових груп свиней.

У розробленій системі реалізовано моніторинг основних параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості, концентрації аміаку, вуглекислого газу, швидкості повітряного потоку та рівня освітленості. Для вимірювання температури встановлено цифрові датчики DHT22, що характеризуються високою точністю (до ±0,3 °C) та стабільністю показів. Вимірювання вологості здійснюється за допомогою комбінованих сенсорів, які передають сигнали безпосередньо на контролер у цифровому форматі, що усуває похибки, властиві аналоговим пристроям. Для контролю складу повітря використовується газовий датчик MQ-135, здатний визначати концентрації CO_2 та NH_3, що є критично важливим для запобігання отруєнням і зниження продуктивності тварин. Швидкість руху повітря контролюється анемометричними сенсорами, а рівень освітлення – фотометричними елементами, що дозволяє автоматично регулювати освітлення у приміщенні відповідно до добового циклу.

Центральним елементом системи є мікроконтролер Arduino Mega 2560, який виконує функції збору, аналізу, збереження та передавання даних. Контролер формує сигнали керування виконавчими механізмами, забезпечуючи стабільність параметрів середовища. Система має вбудований Ethernet-модуль, що дає можливість віддаленого моніторингу та керування через локальну мережу або інтернет. Інтерфейс моніторингу дозволяє оператору переглядати графіки зміни параметрів у реальному часі, задавати порогові значення та налаштовувати режими роботи системи.

До складу виконавчих механізмів входять електричні нагрівачі, вентилятори припливної та витяжної вентиляції, зволожувачі, осушувачі, а також механічні клапани

регулювання подачі свіжого повітря. Керування здійснюється через силові реле, які забезпечують надійне комутаційне з'єднання між контролером і обладнанням. Усі компоненти системи працюють у тісній взаємодії, що забезпечує плавну зміну режимів без різких коливань параметрів. Наприклад, під час зниження температури нижче допустимого рівня контролер активує систему підігріву, при підвищенні вологості – вмикає вентиляційні канали для інтенсивного повітрообміну, а за зниження концентрації кисню – підсилює приплив свіжого повітря.

Принцип дії системи ґрунтується на замкненому циклі керування із зворотним зв'язком. Контролер постійно аналізує поточні показники з датчиків, порівнює їх із заданими еталонними значеннями та формує відповідні регулюючі дії. Застосування пропорційно-інтегрального регулятора забезпечує швидке реагування системи на відхилення та запобігає перерегулюванню. У результаті забезпечується стабільність температури в межах ±0,5 °C і вологості – не більше ±3% від заданих значень, що підтверджено експериментальними дослідженнями під час натурних випробувань.

Особливістю системи є можливість архівації даних та формування звітів про динаміку параметрів мікроклімату. Це дозволяє оператору аналізувати ефективність роботи вентиляції, опалення та зволоження, виявляти тенденції зміни параметрів і прогнозувати потреби у корекції режимів роботи. Додатково реалізовано систему оповіщення про відхилення від норм, яка надсилає повідомлення на мобільний пристрій або комп'ютер відповідального оператора.

Результати моделювання та експлуатаційних випробувань показали, що впроваджена система забезпечує зменшення споживання електроенергії на 18–22% порівняно з традиційними системами керування, а також сприяє підвищенню середньодобових приростів живої маси свиней на 8–10%. Завдяки стабільному мікроклімату скорочено випадки захворювань, пов'язаних із температурними коливаннями та підвищеною вологістю.

Висновок. Розроблена та впроваджена автоматизована система керування мікрокліматом свинокомплексу повністю відповідає сучасним вимогам енергоефективності, надійності та точності регулювання. Система забезпечує підтримання оптимальних параметрів повітряного середовища, сприяє покращенню умов утримання тварин, підвищенню продуктивності та зниженню експлуатаційних витрат. Реалізовані алгоритми керування та модулі збору даних створюють передумови для подальшого розвитку системи у напрямі інтелектуального керування з використанням штучного інтелекту, що дозволить автоматично прогнозувати зміни мікроклімату та адаптувати режими роботи обладнання без втручання оператора.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Норми мікроклімату на фермі тваринництва. Шкода та контроль вологості. Осушувачі повітря [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://osushuvachi.com.ua/statti/normi-mikroklimatu-na-fermi-tvarinnictva-shkoda-kontrol-vogkosti

2. ДСТУ 7823:2015. Ферми тваринницькі. Вимоги до параметрів мікроклімату тваринницьких приміщень. – Чинний від 2015-06-22. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2015. – 13 с.

3. Оптимізація технологічних рішень утримання і годівлі свиней в умовах промислової технології : монографія / В. Я. Лихач, М. Г. Повод, М. Б. Шпетний, В. М. Нечмілов, А. В. Лихач, О. Г. Михалко, Є. В. Баркарь, Л. Г. Леньков, О. О. Кучер. – Миколаїв : Іліон, 2023. – 518 с.

4. Здоровий мікроклімат для свиней на свинокомплексі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://agrotimes.ua/article/zdorovyj-mikroklimat-dlya-svynej-na-svynokompleksi/

УДК 621.311

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЧИМИ ПРОЦЕСАМИ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Єрьоменко М. О., студ.
Єременко А. О., студ.
Піскачова І. В., к.т.н., с.н.с., e-mail: piskachova@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. В умовах сучасної економіки автоматизація у сільському господарстві є одним з основних напрямів розвитку науково-технічного прогресу. Істотними тенденціями сучасного сільськогосподарського виробництва є постійне зростання його масштабів, підвищення кількості і якості сільськогосподарських продуктів. Комплексна автоматизація виробничих процесів в агропромисловому комплексі (АПК) дозволяє підвищити продуктивність і поліпшити умови праці, збільшити кількість і якість одержуваної продукції, звільнити працівників від важкої фізичної й одноманітної розумової праці, знизити втрати і собівартість продукції, підвищити терміни служби сільськогосподарської техніки. Максимальна автоматизація всіх виробничих процесів в сільському господарстві входить в стратегії розвитку найбільших агропромислових і машинобудівних компаній в світі.

Покращення якості роботи та автоматизованих систем керування (АСК) агропромислового комплексу (АПК) неможливе без оцінювання надійності їх функціонування. Причиною, яка потребує оцінювання надійності, є підвищення складності програмних (ПЗ) та апаратних засобів (АЗ) АСК, апаратури обслуговування, умов експлуатації і відповідальності задач, які на них покладають. Таким чином, питання підвищення та оцінки надійності ПЗ та АЗ при проектуванні та експлуатації АСК є актуальним.

Метою дослідження є підвищення надійності АСК на основі методу багатоверсійного мажоритарного резервування і вибору структур із заданою безвідмовністю.

Основні матеріали досліджень. Не дивлячись на множину методів із забезпечення надійного функціонування АСК, що використовуються, достатньо часто виникають порушення працездатності їх, що викликане як відмовами елементів АЗ, так і дефектами ПЗ. Недостатня надійність ПЗ та АЗ призводить до збільшення експлуатаційних витрат порівняно з загальними витратами на проектування, виробництво і використання цих засобів [1]. У більшості АСК, які використовуються в АПК, надійність підтримується за рахунок методу мажоритарного резервування за принципом два справних канали з трьох, або два справних канали з чотирьох. Застосування відомих методів мажоритарного резервування істотно підвищує надійність, у першу чергу АЗ. Невідповідність ПЗ поставленим задачам може виникати за двох причин: або розроблювачем ПЗ допущене порушення специфікації, або специфікація неточна чи неповна. Характерною рисою дефектів, що обумовлюють відмову ПЗ, є прихованість помилок, тобто рідкісних комбінацій вихідних даних, і тому вони виявляються не відразу, а тільки після тривалої експлуатації. Тому доцільно використовувати метод підвищення надійності МС з використанням багатоверсійності ПЗ [2].

Для оцінки надійності багатоверсійних мажоритарно-резервованих систем (БМРС) із різною кількістю каналів АЗ і версій ПЗ повинні застосовуватися складні формули, що залежать від конкретної структури системи: $P_{БМРС} = f\{p1, p2, A\}$, де $P_{БМРС}$ – імовірність безвідмовної роботи (ІБР) МС; А – архітектура системи; р1 – ІБР АЗ одного каналу, р2 – ІБР ПЗ одного каналу.

Вважаємо, що відмова системи наступає в тому випадку, коли на одному з її надлишкових виходів кількість помилок дорівнює або не перевищує поріг відмов. Оптимальне резервування (введення надмірності) полягає в тому, щоб досягти максимального показника надійності за умови, щоб не були перевищені деякі обмеження, обумовлені ТТЗ. Число можливих структур БМРС від числа каналів наведено на рис. 1.

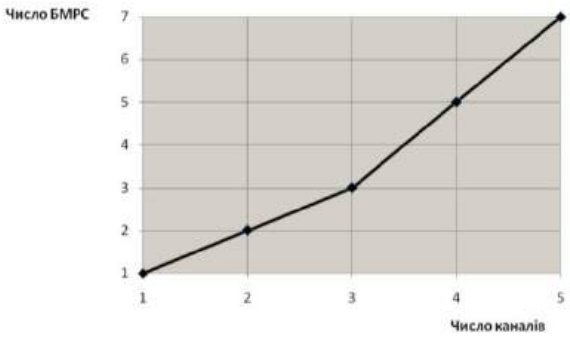


Рисунок 1 – Графік залежності числа можливих структур БМРС від числа каналів

Для досліджень узяли п’ять варіантів чотириканальних БМРС: одноверсійну 4БМРС; двоверсійна 31БМРС; двоверсійну 22БМРС; триверсійну 211БМРС; чотириверсійну 1111БМРС.

По аналітичні залежності для оцінки ІБР: P4, P22, P31, P1111 – одно-, дво-, три- і чотириверсійних чотириканальних неадаптивних БМРС; зі схемами МЕ "2 із 4" [1, 2].

$$P4 = (3\cdot p1^2 - 8\cdot p1 + 6)\cdot p2\cdot p1^2\cdot Pме24;$$

$$P22 = (3\cdot p1^2\cdot p2 - 8\cdot p1\cdot p2 + 4\cdot p2 + 2)\cdot p2\cdot p1^2\cdot Pме24\cdot Dк;$$

$$P211 = (-4\cdot p1^3\cdot p2^3 + 3\cdot p1^4\cdot p2^3 - 3\cdot p2\cdot p1 - 4\cdot p1^3\cdot p2^2 + +5\cdot p1^2\cdot p2^2 + p1^2\cdot p2)\cdot Pме24\cdot Dк;$$

$$P31 = (3\cdot p1^2\cdot p2 - 6\cdot p1\cdot p2 - 2\cdot p1 + 3\cdot p2 + 3)\cdot p2\cdot p1^2\cdot Pме24;$$

$$P1111 = (3\cdot p1^2\cdot p2^2 - 8\cdot p1\cdot p2 + 6)\cdot p2^2\cdot p1^2\cdot Pме24,$$

де Рме24 – ІБР МЕ за схемою "2 із 4", "3 із 5" і "2 із 5" відповідно; Dк – достовірність контролю.

При досліджені БМРС з різною кількістю версій отримані графічні залежності (рис. 2).

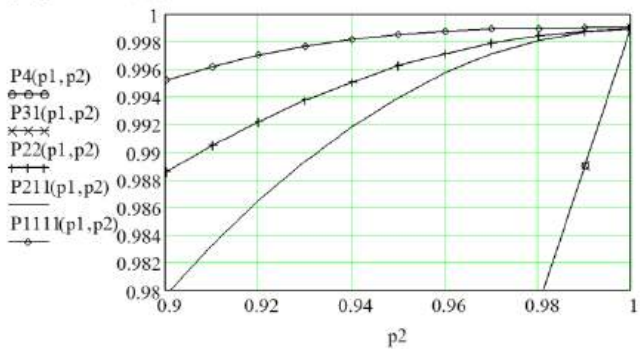


Рисунок 2 – Графіки залежностей ІБР чотириканальних БМРС від часу при $\lambda 1=\lambda 2=10^{-6}$ 1/год, λме24$=10^{-8}$ 1/год

Висновок. У результаті виконання роботи досліджено можливість при проектуванні АСК для АПК використання методу багатоверсійного багатоканального мажоритарного резервування на прикладі чотириканальних структур, побудовані пріоритетні ряди, за допомогою котрих можна визначити найкращу структуру для деяких параметрів надійності. Використання методу підвищення надійності на основі багатоверсійного мажоритарного резервування при проектуванні повинне забезпечити високий рівень надійності АСК, яка функціонує у реальному масштабі часу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kolisnyk M., Piskachova I., Kharchenko V. The Method of Diversity-Based Ensuring the Reliability of the Router in the IIoT System. *International Journal of Computing*. 2024. P. 324–332. URL: https://doi.org/10.47839/ijc.23.3.3651.

2. Kolisnyk M., Piskachova I., Kharchenko V. Reliability Models of Diverse Majority-redundant Systems with Threshold Adaptation. *2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 11–13 October 2024. 2024. P. 1–7. URL: https://doi.org/10.1109/dessert65323.2024.11122217.

УДК 631.364.1

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПТАШНИКА

Ісаєв О. С., магістр, e-mail: olegisaev200@gmail.com
Піскачова І. В., к.т.н., доц., e-mail: simba_aig@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Основу птахівництва напрямку складають великі птахофабрики промислового типу, питома вага яких у виробництві м’яса перевищує 60%. З технологічної точки зору, пташник є надзвичайно складним об'єктом. Висока концентрація птиці, засобів виробництва, наявність агресивного середовища, технологічні особливості виробництва – усе це впливає на якість управління. Перевитрата енергоресурсів, при підтримці заданого рівня температури, напряму залежить від якості управління. Управління енергетичними потоками, що підтримують задану температуру в пташнику, відбувається за певними законами. Саме від обраного закону управління, повноти інформації про поточні процеси залежать якість управління.

Мета дослідження – розробка системи автоматичного управління температурним режимом з використанням сучасної елементної бази та енергоефективних алгоритмів роботи для зменшення енерговитрат на створення мікроклімату в промислових пташниках.

Основні матеріали досліджень. Птахівництво – одна з найбільш інтенсивних і динамічних галузей агропромислового комплексу країни. Відомо, що мікроклімат суттєво впливає на продуктивність птиці. У птахівницьких приміщеннях головними чинниками мікроклімату є: тепло, вологість, якісний склад і швидкість повітря, стан підстилки, освітленість. Зазначені чинники, кожний окремо та в комплексі, є сильними зовнішніми подразниками для організму птахів. У дозах, що перевищують фізіологічні норми, вони можуть негативно впливати на його стан і продуктивність.

Пташники як об’єкт регулювання мікроклімату – це складні об’єкти, так як параметри мікроклімату тісно пов’язані між собою. Так вентиляція впливає не лише на концентрацію газів, але і на температуру та вологість повітря в приміщенні. Слід враховувати, що на вихідні параметри мікроклімату повітря в приміщенні впливають також значення температури, вологості зовнішнього середовища, кількість тепловиділень від птахів, тощо.

Автоматизація систем мікроклімату дозволяє створити й підтримувати оптимальні умови повітряного середовища у птахівницьких приміщеннях. В результаті застосування автоматизації підвищується продуктивність птиці, скорочуються витрати ручної праці і зменшується витрата електричної й теплової енергій. Вважається, що використання навіть найпростіших пристроїв підтримки температурних режимів дозволяє заощаджувати до 30% електроенергії.

При розробці автоматичних систем мікроклімату необхідно враховувати наступні особливості:

- складність автоматизації мікроклімату у птахівничих приміщеннях обумовлена залежністю регульованих параметрів (температура, швидкість руху, відносна вологість повітря та ін.) від зовнішніх і внутрішніх факторів і їхнім взаємозв’язком, які змінюються протягом доби і тим більше в різні періоди року;
- розосередженість у широких межах контрольованих і регульованих параметрів як за обсягом, так і за часом;
- безупинний технологічний зв’язок систем мікроклімату з живими організмами, для яких характерна безперервність біологічних процесів;
- роботу устаткування в приміщеннях із підвищеним вмістом вологи, пилу й агресивних газів.

За призначенням вентиляційні установки поділяють на припливні, витяжні та комбіновані. У витяжних системах, як правило, використовують осьові вентилятори.

Типовим прикладом системи витяжної вентиляції є вентиляційне обладнання «Клімат-4», яке залежно від виконання комплектується осьовими вентиляторами типу ВО різної кількості та продуктивності.

Комплект «Клімат-4М» здійснює витяжну вентиляцію. Він поставляється у двох варіантах – «Клімат-45М» і «Клімат-47М», які відрізняються між собою за типом і кількістю вентиляторів.

До складу комплекту входять: група електровентиляторів типу ВО-5.6МУЗ (комплект «Клімат-45М») або ВО-7.1МУЗ (комплект «Климат-47М»). шафа керування ШОА9203-3474УХЛЗ, або пристрій керування комплектний «Климатика-1» типу ТСУ-2-КЛУЗ з чотирма термоперетворювачами та ін.

Схема розміщення обладнання для підтримання оптимального мікроклімату пташника представлена на рисунку 1.

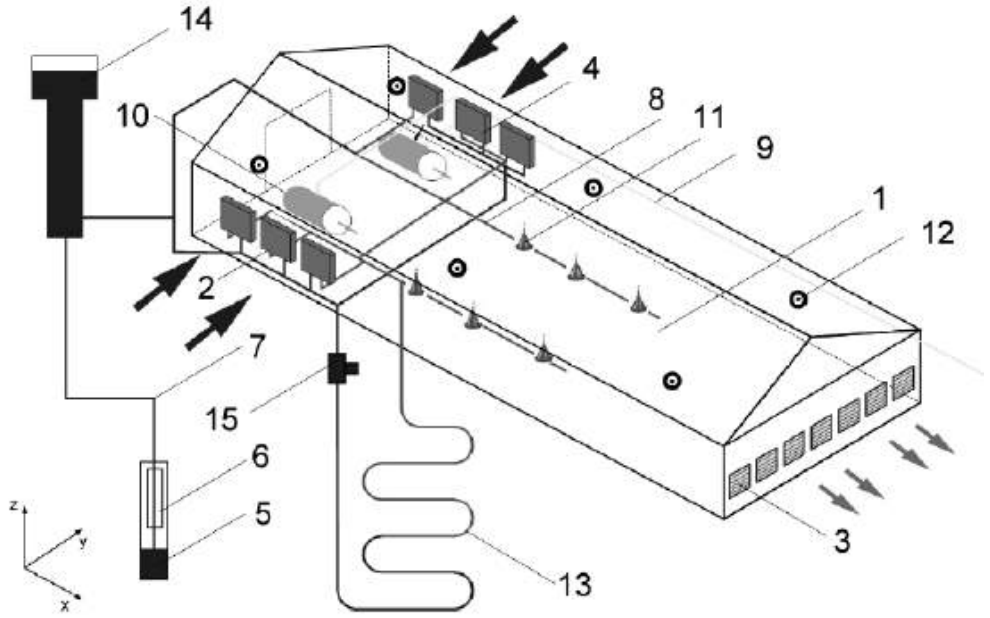


Рисунок 1 – Розміщення обладнання для підтримання оптимального мікроклімату пташника: 1 – приміщення пташника, 2 – вентиляційні вікна, 3 – витяжні вентилятори, 4 – теплообмінний апарат, 5 – свердловина, 6 – свердловинний насос, 7 – вхідний трубопровід, 8 – вихідний трубопровід, 9 – газопровід, 10 – теплогенератори, 11 – поїлки, 12 – датчики температури, вологості і концентрація шкідливих викидів, 13 – ґрунтовий теплообмінник, 14 – водонапірна башта, 15 – циркуляційний насос

Висновок. У результаті проведеного в роботі аналізу мікроклімату в пташниках, як об’єкта регулювання, встановлено, що це складний об’єкт, так як параметри мікроклімату тісно взаємозалежні між собою. Визначальними параметрами, що характеризують стан внутрішнього повітряного середовища у птахівничих приміщеннях і піддаються безпосередньому регулюванню, треба вважати температуру, швидкість руху, відносну вологість, і газовий склад повітря.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кропивко В. Сучасний стан розвитку птахівництва в Україні / В. Кропивко // Тваринництво сьогодні .– 2020 .– №3. – С. 17-19.

2. Титова В.І., Сєдов Л.К., Дабахова Є.В. Індустріальне птахівництво і екологія: досвід співіснування: монографія. Івано-Франківськ: ВВАДС, 2004. 165 с.

УДК 631.364.1

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛІНІЇ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

Калітієвський В. М., магістр, e-mail: shampanskiy.85@gmail.com
Абраменко І. Г., к.т.н., доц., e-mail: simba_aig@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Однією з основних умов розвитку тваринницької галузі є зниження собівартості виробництва молока за рахунок енерго- та ресурсозбереження. Дослідження, які проводяться з вирішення даної проблеми, показали актуальність даного напряму та затребуваність інженерних рішень у галузі акумулювання холоду та розробки систем охолодження молока, які забезпечують раціональне використання природно-енергетичних ресурсів. Основною причиною, що змушує досліджувати дану проблему сьогодні – це постійне збільшення частки електроенергії, а також значні відмінності вартості електроенергії у денний та нічний час; так, вартість 1 кВт · год у нічний час нижча в декілька разів. Не менш важливим є підвищення надійності систем охолодження, що особливо важливо на фермах при первинній обробці молока та напуванні тварин.

Мета дослідження. Проведення досліджень систем для охолодження молока молочної ферми великої рогатої худоби з удосконаленням лінії охолодження молока.

Основні матеріали досліджень. Молоко є цінним харчовим продуктом, що містить необхідні для організму поживні речовини Тому для збереження поживних властивостей молоко охолоджують. Швидке охолодження попереджає розмноження мікроорганізмів, що продовжує його бактерицидну фазу.

Температура охолодження визначається терміном зберігання молока на фермі. Так, при щоденній здачі молока, його охолоджують до температури 4 ºС.

В даний час на тваринницьких фермах та комплексах використовують такі системи охолодження молока.

Пряме охолодження в танку (резервуарі-охолоджувачі). Відфільтроване молоко надходить прямо в танк і там охолоджується фреоновим випарником охолоджувача.

Попереднє охолодження проточною водою та доохолодження в танку. Після фільтрації молоко проходить через пластинчастий теплообмінник, назустріч потоку молока проходить потік проточної води. Вода забирає частину температури молока, яке доохолоджується потім у танку.

Попереднє охолодження проточною водою, охолодження крижаною водою/гліколем, зберігання у танку. Після фільтрації молоко проходить через пластинчастий теплообмінник, назустріч потоку молока проходить потік проточної води, потім потік холодоагенту, після чого молоко надходить у танк з температурою зберігання 2–4 ºС.

Повне охолодження в потоці крижаною водою. Аналогічно попередній системі охолодження за винятком відсутності проходження потоку молока через проточну воду.

Найширше застосування отримали системи прямого охолодження в танках-охолоджувачах, класифікація яких проводиться за кількома критеріям. Першим із критеріїв є потужність охолоджувальної установки, яка залежить від кількості молока (надою), що одночасно надходить у танк після доїння. Таким чином, танки призначенні для охолодження 2 надоїв (50% об'єму танка), 4 надоїв (25% об'єму танка) та 6 надоїв (16,5% об'єму танка) від 35 ºС до 4 ºС протягом 3 годин. Допустима температура навколишнього середовища є другим критерієм. Вона поділяє танки на три класи від «А» до «С» за відповідних температур від 43 ºС до 32 ºС.

Наступні класифікаційні критерії поділу танків враховують їх конструктивні та експлуатаційні особливості, такі як тип і форма, також максимальний час охолодження.

Основними перевагами використання танків є їх нескладна конструкція, простота обслуговування, універсальність, низька вартість, компактність, можливість автоматичного промивання. За всіх їх переваги для охолодження молока до заданої температури необхідно

близько 3 годин, а також наявність мінімального його обсягу, що призводить до розмноження бактерій у даний період.

Рисунок 1 – Універсальний танк-охолоджувач молока

Розміщення у напірну магістраль перед молочним фільтром пластинчастого теплообмінника дозволяє попередньо охолоджувати молоко проточною водою та з подальшим доохолодженням у танку. Така система зберігає всі плюси прямого охолодження в танку, компактність, дозволяє знизити витрати на електроенергію та придбання танка, а також отримати підігріту воду після теплообміну, яку можна використовувати для напування, змивання гною чи інші господарські потреби.

При цьому підвищуються вимоги до якості води через чутливість теплообмінних систем, для здійснення промивання теплообмінника, а також постає питання використання води після охолодження за відсутності можливості її повторного використання.

Системи попереднього охолодження молока проточною водою з подальшим охолодженням крижаною водою / гліколем або відразу повного охолодження практично аналогічні. Відмінність її полягає в кількості ступенів охолодження, де використовується рідина та обладнання для генерації охолодження. Через миттєве охолодження такі системи дозволяють отримувати молоко високої якості з безпосереднім завантаженням у цистерни-причепи та транспортуванням на молокопереробні підприємства. Їх відмінності та переваги полягають у технічній прийнятності будь-яких потоків та кількості молока, можливості використання будь-яких теплоємностей для зберігання молока та простому механізмі резервування робочих органів.

Однак використання таких систем передбачає високу вартість їх компонентів, порівняно більше споживання електроенергії, необхідність додаткових витрат на встановлення лічильників молока, їхня технічна складність, високі вимоги до сервісної служби та обслуговуючого персоналу.

Висновок. Проведений аналіз систем для охолодження молока та нагріву води і розроблено технологічну схему машин та наведений опис технологічного процесу роботи схеми циркуляції рідини в двосекційному пластинчастому охолоджувачі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Експлуатація теплообмінних апаратів для молочного виробництва: Методичні рекомендації та завдання щодо виконання лабораторно-практичної роботи студентам денної та заочної форми навчання. – Х.: ДБТУ, 2023. – 30 с.

2. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / В.Г. Мирончук, І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. За ред. доктора технічних наук, професора Мирончука В.Г. – Вінниця: Нова книга, 2007. – 648 с.

УДК 004.89:004.421.2:004.45

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДБОРУ КОНФІГУРАЦІЇ ПЕРСОНАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРІВ ПІД ПОТРЕБИ КОРИСТУВАЧА

Караджаєв Д. Р., магістрант, e-mail: karramiz79@gmail.com
Тимчук С. О., д.т.н., доц., e-mail: s.tymchuk@itp.sumdu.edu.ua
Сумський державний університет

Актуальність дослідження. Ринок комп'ютерних комплектуючих стрімко розвивається, пропонуючи користувачам велику кількість процесорів, відеокарт, материнських плат та інших компонентів, що оновлюються кожні 6–12 місяців. Ця різноманітність, з одного боку, дозволяє зібрати систему, що ідеально відповідає потребам, а з іншого — створює значні труднощі для звичайного споживача [1, с. 1–2]. Неправильний вибір компонентів може призвести до проблем із сумісністю, неефективного використання бюджету або, так званих «пляшкових горлечок» (bottlenecks), коли один слабкий компонент обмежує продуктивність всієї системи [2, с. 2–3].

Користувачі мають кардинально різні вимоги до ПК: від базових офісних завдань та вебсерфінгу до професійної роботи з 3D-графікою, відеомонтажу та сучасних відеоігор, що вимагають максимальної обчислювальної потужності. Для непідготовленої людини аналіз десятків параметрів (тактові частоти, кількість ядер, типи сокетів, стандарти пам'яті, потужність блоку живлення) є надскладним завданням [3, с. 1–2]. Існуючі онлайн-конфігуратори часто пропонують обмежений набір компонентів або не враховують специфічні сценарії використання.

Таким чином, розробка інтелектуальної інформаційної технології, яка б автоматизувала процес підбору оптимальної конфігурації ПК на основі чітко визначених потреб користувача, є надзвичайно актуальним завданням. Така система дозволить мінімізувати ризики помилок, оптимізувати витрати та підвищити рівень задоволеності кінцевого споживача.

Метою дослідження є розробка архітектури та алгоритмів функціонування інформаційної технології для автоматизованого підбору конфігурації персонального комп'ютера. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати існуючі підходи та засоби для конфігурування ПК.
2. Систематизувати ключові параметри комп'ютерних компонентів та критерії їх сумісності.
3. Розробити модель подання знань про предметну область, що включає базу даних компонентів та набір правил для їх підбору.
4. Створити алгоритм, що на основі вхідних даних від користувача (бюджет, основні завдання) формує збалансовану та сумісну конфігурацію ПК.
5. Запропонувати архітектуру інформаційної системи, що реалізує розроблену технологію.

Основні матеріали досліджень. В основі пропонованої інформаційної технології лежить підхід, що поєднує експертну систему з реляційною базою даних. Архітектура системи складається з чотирьох основних модулів:

1. Модуль взаємодії з користувачем. На цьому етапі система збирає первинні вимоги через інтерактивне анкетування. Користувачу пропонується вказати:
   - Бюджет: загальна сума, яку він готовий витратити.
   - Основний сценарій використання: вибір із передвстановлених профілів або комбінація декількох.
   - Додаткові побажання: переваги щодо виробників (Intel/AMD, Nvidia/AMD), вимоги до розміру корпусу, наявність RGB-підсвічування тощо.
2. База знань. Цей модуль є ядром системи і складається з двох компонентів:

- База даних комплектуючих: реляційна база даних, що містить актуальну інформацію про доступні на ринку компоненти (CPU, GPU, RAM, материнські плати, накопичувачі, блоки живлення, корпуси). Для кожного компонента зберігаються його технічні характеристики, ціна та унікальний ідентифікатор.
- База правил: набір логічних правил, що описують сумісність та доцільність поєднання компонентів.

3. Механізм логічного виведення. Цей модуль є «мозком» системи. Він обробляє запити користувача, застосовуючи правила з бази знань до даних про комплектуючі. Алгоритм роботи механізму є ітераційним:

- Крок 1: На основі профілю користувача та бюджету визначаються пріоритетні компоненти (для геймера — відеокарта, для робочої станції — процесор та ОЗП).
- Крок 2: Система підбирає ключовий компонент (наприклад, процесор), що відповідає бюджету та завданням.
- Крок 3: На основі вибраного процесора, використовуючи правила сумісності, система фільтрує та пропонує сумісні материнські плати та типи оперативної пам'яті.
- Крок 4: Процес повторюється для всіх інших компонентів, при цьому на кожному етапі система перевіряє, чи не виходить загальна вартість за межі бюджету.
- Крок 5: Система проводить фінальну перевірку на збалансованість, щоб уникнути «пляшкових горлечок».

4. Модуль генерації результатів. Результат роботи системи подається користувачу у вигляді детального списку рекомендованих компонентів із зазначенням їхньої поточної ринкової ціни, поясненням вибору та прогнозованою продуктивністю в ключових для користувача завданнях.

Висновок. У ході дослідження було розроблено концептуальну архітектуру інформаційної технології для автоматизованого підбору конфігурації ПК. Запропонована модель, що базується на експертних правилах та актуальній базі даних компонентів, дозволяє вирішити проблему інформаційної перевантаженості користувача та мінімізувати ризики, пов'язані з самостійним вибором комплектуючих.

Дана технологія може бути реалізована у вигляді вебсервісу або десктопного додатку і буде корисною як для звичайних споживачів, так і для компаній-збирачів ПК. Подальший розвиток проєкту може включати інтеграцію з онлайн-магазинами для моніторингу цін у реальному часі, а також впровадження елементів машинного навчання для аналізу відгуків користувачів та автоматичного оновлення бази правил на основі найуспішніших конфігурацій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Felfernig, A., Reiterer, S., Stettinger, M., & Jeran, M. An Overview of Direct Diagnosis and Repair Techniques in the WeeVis Recommendation Environment. *ArXiv, abs/2102.12327*. (2021): 1-2. pag.

2. Gernone, Fausto. “Estimating Bottleneck Power: A Network Analysis of Competition in the Early PC Industry.” *SSRN Electronic Journal* (2025): 2-3. pag. DOI: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5401883

3. Aryanta, Rafi Rizkya and Z K Abdurahman Baizal. “Conversational Recommender System based on Functional Requirement using Knowledge Graph for Building Personal Computer.” *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)* (2023): 1-2. pag. DOI: https://doi.org/10.47065/bits.v4i4.2978

УДК 004.89

ПРОЄКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ

Ковальчук Д. М., ст. викл., e-mail: kovalchuk.mitia@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Забезпечення комфортного мікроклімату у приміщенні є важливим аспектом для підтримки ефективності роботи людини та її самопочуття. На параметри мікроклімату впливають температура повітря, вологість, концентрація вуглекислого газу, наявність пилу та інші фактори, що безпосередньо визначають рівень комфорту та продуктивність. Підтримка оптимальних умов у приміщенні передбачає збереження теплового балансу між людиною та навколишнім середовищем.

Параметри мікроклімату можна класифікувати на дві групи: оптимальні та допустимі. Оптимальні параметри характеризують комфортні умови для людини та забезпечують функціональну стабільність організму. Допустимі значення визначають межі, у яких перебування в приміщенні ще можливе без суттєвого погіршення самопочуття.

Сучасні підходи до управління мікрокліматом передбачають використання мікропроцесорних систем контролю та автоматичного регулювання. Інтелектуальні системи HVAC (heating, ventilation, and air conditioning), інтегровані з IoT-технологіями та алгоритмами машинного навчання, дозволяють ефективно підтримувати комфортні умови, зменшувати енергоспоживання та підвищувати енергоефективність будівель. У випадках, коли параметри мікроклімату змінюються нелінійно і непередбачувано, застосування нечіткої логіки забезпечує більш точне та адаптивне керування, підвищуючи рівень комфорту та стабільність роботи системи.

Метою дослідження є розробка та моделювання нечіткої системи керування мікрокліматом на основі мікропроцесорної платформи, що забезпечує підтримку оптимальної температури та вологості приміщення.

Проєктування системи керування з використанням нечіткого регулятора включає такі етапи:

- визначення вхідних та вихідних змінних системи;
- формування функцій приналежності для кожної змінної;
- створення бази правил нечіткої логіки;
- вибір алгоритму нечіткого виводу;
- моделювання та аналіз роботи системи.

В якості програмного середовища для проєктування застосовано LabView із доповненням Fuzzy System Designer, що дозволяє створювати інтуїтивно зрозумілі інтерфейси та швидко моделювати поведінку нечітких систем. Основними параметрами, що контролюються, є температура та вологість повітря. Датчики вимірюють ці величини і передають сигнал на мікроконтролер.

Для вхідної змінної «температура приміщення» було визначено три терми: «низька», «оптимальна» та «висока». Оптимальна температура коливається в межах 18–24 °C, нижче 18 °C приміщення вважається холодним, а вище 24 °C – надмірно теплим. Вихідні сигнали регулятора формуються у вигляді команд увімкнення/вимкнення для нагрівача, кондиціонера та зволожувача, що мають два стани: «On» та «Off».

Система забезпечує підтримку заданих умов мікроклімату, збираючи дані від датчиків і приймаючи рішення на основі бази правил нечіткої логіки. Такий підхід дозволяє обробляти неточні вимірювання та перетворювати їх у конкретні дії електронних пристроїв.

В якості апаратної платформи використано Arduino UNO, оснащену мікроконтролером ATMEL ATmega328P. Arduino об’єднує мікроконтролер, засоби підключення до зовнішніх периферійних пристроїв та вбудований програматор, що спрощує процес розробки та тестування. Відкрите програмне середовище та велика кількість бібліотек забезпечують

швидку інтеграцію датчиків, виконавчих механізмів та комунікаційних модулів.

Програмна частина реалізована у середовищі IDE Arduino на основі мови C/C++, що дозволяє створювати автономні системи або інтегрувати їх із зовнішнім програмним забезпеченням. У нашому випадку система взаємодіє з LabView, що дає можливість моніторингу та налаштування параметрів мікроклімату у реальному часі.

Моделювання роботи нечіткого регулятора показало, що система здатна ефективно підтримувати комфортні умови у приміщенні навіть при коливаннях зовнішніх факторів. Алгоритм нечіткого виводу забезпечує адаптивну реакцію на зміни температури та вологості, запобігаючи різким коливанням параметрів мікроклімату.

Тестування показало, що інтеграція Arduino та LabView дозволяє швидко реалізувати систему та значно зменшити похибки порівняно з класичними бінарними регуляторами. Крім того, нечітка логіка дає змогу розширити функціонал системи шляхом додавання нових правил та вхідних змінних без суттєвої перебудови апаратної частини.

Використання нечітких регуляторів у таких системах підвищує не лише комфортні показники для людини, а й енергоефективність приміщень. Оптимізація роботи нагрівачів, кондиціонерів та зволожувачів дозволяє зменшити енергоспоживання без зниження рівня комфорту.

Висновок. Розроблено інтелектуальну нечітку систему керування мікрокліматом приміщення на базі мікропроцесорної платформи Arduino UNO. Застосування нечіткої логіки забезпечило гнучке та адаптивне управління параметрами температури та вологості. Інтеграція з LabView дозволила здійснювати швидке моделювання та налаштування системи. Проведене тестування підтвердило відповідність роботи системи вимогам технічного завдання, а також її ефективність у підтриманні оптимальних умов мікроклімату.

Запропонований підхід може бути використаний у широкому спектрі будівель, включаючи житлові та офісні приміщення, виробничі цехи та навчальні заклади. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію IoT-рішень та алгоритмів машинного навчання для підвищення автономності та енергоефективності системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ченчева О., Лашко Ю., Різник Д., Перекрест А., Божик М. Development and research of the functional possibilities of the automated fuzzy indoor air quality management system of production premises // Labour Protection Problems in Ukraine. – 2023. – Vol. 39, № 3-4. – P. 36–42. – DOI: 10.36804/nndipbop.39-3-4.2023.36-42.

2. Mykytyuk Z., Shymchyshyn O., Zvorskyi A., Markiv D. Automation of microclimate control processes in residential premises // ICTEE. – 2024. – Vol. 4, № 1. – P. 155–162. – DOI: 10.23939/ictee2024.01.155. – Режим доступу: https://science.lpnu.ua/ictee/all-volumes-and-issues/volume-4-number-1-2024/automation-microclimate-control-processes

3. Кузьмук А. Розумне керування мікрокліматом [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: https://aw-therm.com.ua/keruvannya-mikroklimatom-u-primishenni/

4. Кривонос О., Власенко Є., Кузьменко С. Огляд та перспективи використання платформи Arduino Nano 3.0 у вищій школі // Information Technologies and Learning Tools. – 2016. – Т. 56. – С. 77. – DOI: 10.33407/itlt.v56i6.1506

5. Karmann A., et al. Towards pragmatic interoperability: a conceptual framework for an energy IoT platform in the German energy sector // CIRED 2024 Vienna Workshop. – Vienna, Austria, 2024. – С. 59–66. – DOI: 10.1049/icp.2024.1880

6. Prasanna B. L., Boda R., Prasad Reddy M. P. Design of Fully Automated Low-Cost Hydroponic System with Arduino Uno and NI LabVIEW // Proceedings of the 2024 3rd Edition of IEEE Delhi Section Flagship Conference (DELCON). New Delhi, India, 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/DELCON64804.2024.10866701.

УДК 620.9:004.8

СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Ковальчук Д. М., ст. викл., e-mail: kovalchuk.mitia@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Система прогнозування електроспоживання з використанням нейронних мереж є однією з ключових технологій сучасного енергетичного менеджменту та оптимізації роботи електричних мереж. Ефективне передбачення споживання електроенергії дозволяє енергокомпаніям планувати виробництво та розподіл енергії, зменшувати втрати, підвищувати надійність системи та забезпечувати стабільність тарифів для кінцевих споживачів. Застосування традиційних статистичних методів прогнозування, таких як лінійна регресія чи авторегресійні моделі, часто виявляється недостатньо точним через складність динаміки електроспоживання, що залежить від багатьох змінних, включаючи погодні умови, сезонні коливання, соціально-економічні фактори та непередбачувані поведінкові патерни споживачів. У цьому контексті нейронні мережі демонструють значні переваги завдяки своїй здатності виявляти нелінійні залежності в даних і адаптуватися до зміни умов.

Сучасні системи прогнозування електроспоживання часто використовують архітектури глибинного навчання, зокрема рекурентні нейронні мережі (RNN) та їх модифікації, такі як довга короткострокова пам’ять (LSTM), які здатні ефективно працювати з часовими рядами. Такі моделі дозволяють враховувати як короткострокові коливання, так і довгострокові тенденції споживання електроенергії. Для навчання нейронної мережі використовуються історичні дані про споживання, погодні умови, календарні дані, свята та інші фактори, які можуть впливати на попит. Після етапу навчання мережа здатна передбачати майбутнє споживання з високим ступенем точності, що дозволяє диспетчерам і планувальникам приймати більш обґрунтовані рішення щодо балансування енергосистеми.

Особливо важливим аспектом у побудові таких систем є попередня обробка даних, яка включає нормалізацію, заповнення пропусків, видалення шуму та аномалій. Якість вхідних даних безпосередньо впливає на точність прогнозів. Крім того, ефективне прогнозування передбачає регулярне оновлення моделей з урахуванням нових даних, що дозволяє нейронній мережі адаптуватися до змінних умов споживання. Важливою складовою системи є також оцінка похибок прогнозування, яка допомагає визначати надійність результатів та вчасно коригувати стратегії виробництва і розподілу енергії.

Розвиток систем прогнозування на базі нейронних мереж відкриває нові можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова генерація, які характеризуються високою мінливістю виробництва. Точне передбачення споживання дозволяє ефективно поєднувати їх з традиційними джерелами електроенергії, знижуючи ризики дефіциту або надлишку електрики та оптимізуючи економічні витрати. Крім того, системи прогнозування можуть бути інтегровані з платформами смарт-метерингу та інтернету речей, що забезпечує реальний час збору даних та адаптивне управління споживанням на рівні кінцевого користувача.

Сучасні дослідження демонструють, що використання нейронних мереж для прогнозування електроспоживання значно перевершує традиційні методи за точністю та гнучкістю. Проте впровадження таких систем потребує комплексного підходу, який поєднує глибоке розуміння енергетики, обробки даних та методів машинного навчання. У майбутньому розвиток гібридних моделей, що поєднують нейронні мережі з іншими методами прогнозування, а також використання великих даних та хмарних обчислень, дозволить створити ще більш точні та адаптивні системи управління електроенергетикою, що забезпечуватимуть стабільність та ефективність енергомереж у умовах зростаючого попиту та інтеграції відновлюваних джерел.

Запропонована архітектура системи прогнозування електроспоживання на основі нейронних мереж є багаторівневою та модульною, що дозволяє забезпечити ефективну обробку великих обсягів даних, їхнє коректне структурування, адаптивне навчання та якісне прогнозування. Ключові компоненти системи включають модуль збору даних, модуль попередньої обробки, модуль побудови та навчання моделі, модуль прогнозування, блок оцінки точності та модуль інтеграції з системою керування енергорозподільними процесами. Кожен із цих модулів виконує спеціалізовані функції, формуючи повний замкнений цикл інтелектуального управління енергоспоживанням.

1) Модуль збору та агрегації даних. На цьому етапі система отримує дані з різних джерел: історичних записів про споживання електроенергії, погодних станцій, IoT-сенсорів, смарт-лічильників, SCADA-систем, відкритих календарів, даних про промислові навантаження та інші релевантні параметри. Дані надходять у реальному часі та формується централізоване сховище даних, часто у вигляді Data Lake, де забезпечується масштабованість та надійність зберігання.

2) Модуль попередньої обробки даних. Цей блок виконує очищення даних від шумів, пропусків і аномалій, а також нормалізацію та приведення до єдиних часових форматів. Коректна підготовка даних є визначальним чинником успішності навчання нейронної мережі.

3) Модуль побудови та навчання нейронної мережі. Основою моделі виступає глибинна нейронна мережа для аналізу часових рядів. LSTM архітектура, здатна зберігати інформацію про попередні стани системи та коректно оцінювати вплив історичних даних на майбутні значення. Процес навчання реалізується з оптимізацією ваг за допомогою алгоритмів Adam чи RMSProp з регуляризацією для запобігання перенавчанню. Навчання здійснюється в режимі online-learning для адаптації до нових умов.

4) Модуль прогнозування. Навчена модель генерує прогноз на певний часовий горизонт – від кількох хвилин до місяців вперед – залежно від задачі. Система генерує як точкові прогнози, так і інтервальні, що дозволяє оцінити ризики та імовірні сценарії розвитку навантаження.

5) Модуль оцінки точності та валідації. Результати порівнюються з фактичними значеннями за допомогою метрик похибки, таких як MSE, MAE, RMSE або MAPE. Крім того, здійснюється аналіз стабільності прогнозування, визначення трендів помилок та автоматичне перенавчання моделі при погіршенні точності. Цей етап забезпечує надійність і стійкість роботи системи.

6) Модуль інтеграції з енергосистемою та прийняття рішень. Сформовані прогнози надходять у систему оперативного планування та управління, де використовуються для балансування енергомережі, оптимізації роботи електростанцій, прогнозування пікових навантажень, керування накопичувачами енергії та розподіленими енергоресурсами. Можлива інтеграція з модулями оптимізації тарифів, управління попитом (Demand-Response) та планування генерації з відновлюваних джерел.

Таким чином, розроблена архітектура забезпечує не лише точне прогнозування споживання, але й операційну адаптивність системи, оптимізацію енергоресурсів та підвищення надійності електромережі. Впровадження таких систем сприяє переходу до концепції розумних енергетичних мереж (Smart Grid), де інформаційні технології та штучний інтелект відіграють ключову роль у прийнятті управлінських рішень та забезпеченні стабільності енергосистеми.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Qureshi M., Arbab M.A., Rehman S. Deep learning-based forecasting of electricity consumption. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. no. 6489. DOI: 10.1038/s41598-024-56602-4.

2. Abumohsen M., Owda A.Y., Owda M. Electrical Load Forecasting Using LSTM, GRU, and RNN Algorithms. Energies. 2023. Vol. 16. No. 5. Art. 2283. DOI: 10.3390/en16052283.
and RNN Algorithms. Energies. 2023. Vol. 16. No. 5. Art. 2283. DOI: 10.3390/en16052283.

УДК 629.7.05

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НАВІГАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ БПЛА ДЛЯ СІЛЬГОСПМОНІТОРИНГУ

Корнієнко С. В., здобувач РВО магістр, e-mail: kornienkosv1987@gmail.com
Нечитайло Ю. А., к.т.н., доц., e-mail: nechitaylo@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) дедалі активніше застосовуються в сільському господарстві для моніторингу земельних ресурсів, оцінки стану та росту сільськогосподарських культур, прогнозування врожайності, а також для управління агротехнічними заходами. Застосування БПЛА забезпечує оперативність, високу точність та значне скорочення витрат часу на моніторинг великих територій. Вдосконалення навігаційних і автоматизованих систем БПЛА є ключовим завданням для підвищення ефективності сільськогосподарського моніторингу в Україні та світі [1].

Метою дослідження є аналіз сучасних технологій навігації та автоматизації безпілотних літальних апаратів, які застосовуються у сільськогосподарському моніторингу, визначення їхніх переваг, недоліків та перспектив розвитку. Особливу увагу приділено автономній навігації у разі відсутності GPS і інтеграції мультисенсорних систем для підвищення точності позиціонування та ефективності виконання моніторингових завдань.

Основні матеріали досліджень. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) для сільськогосподарського моніторингу оснащуються складними багатокомпонентними навігаційними системами. Вони містять супутникові GNSS-приймачі (GPS, GLONASS, Galileo), які забезпечують глобальне позиціювання з високою точністю, але можуть бути вразливими до атмосферних та електромагнітних завад. Інерційні вимірювальні блоки (IMU) додають стабільність і дозволяють підтримувати орієнтацію й положення дрона навіть при втраті сигналу GNSS, зберігаючи інформацію про рух і положення [2].

Візуальна навігація з використанням камер (FPV) і технологій SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) значно підвищує автономність систем і дозволяє дронам будувати детальні карти місцевості, зменшуючи залежність від супутникових сигналів [3]. Комбіновані гібридні системи інтегрують дані з різних сенсорів (GNSS, IMU, візуальні дані), що дозволяє забезпечувати максимальну точність позиціонування і стабільність польоту навіть у складних польових умовах.

У сільському господарстві для моніторингу стану рослинності активно використовуються мультиспектральні камери, які дають змогу виявляти проблемні зони, оцінювати біометричні показники культур, а також розраховувати вегетаційні індекси, зокрема NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [4]. Обробка отриманих знімків із застосуванням алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту прискорює аналіз великих обсягів даних, виявляє аномалії, допомагає приймати оперативні рішення для оптимізації агротехнічних заходів.

Особливою увагою користується компактний дрон DJI Mini 2 (рис. 1), вага якого всього 249 грамів, що звільняє його від багатьох регуляторних обмежень та сприяє зручності використання в аграрній сфері. DJI Mini 2 оснащений 12-мегапіксельною камерою з можливістю відеозапису у форматі 4K при 30 fps, системами позиціонування GPS/GLONASS/Galileo, барометром та трьохосьовим моторизованим підвісом для стабілізації зображення. Максимальний час польоту дрона сягає 31 хвилини, що дозволяє здійснювати масштабні аерозйомки. Технологія передачі OcuSync 2.0 забезпечує стабільний HD-зв'язок на відстані до 6 км за оптимальних умов, а конструкція забезпечує стійкість до вітру до 10,5 м/с. Програма управління DJI Fly робить його доступним для операторів різного рівня, а інтуїтивно зрозумілий пульт управління спрощує процес керування [5]. Хоч DJI Mini 2 має обмежені можливості в порівнянні з професійними агродронами, оснащеними

мультиспектральними датчиками, він є ефективним інструментом для локального та навчального моніторингу посівів, виконуючи базові завдання з високою якістю.

Рисунок 1 – Безпілотний літальний апарат DJI Mini 2

Висновок. Сучасні технології навігації та автоматизації БПЛА значно підвищують точність і оперативність сільськогосподарського моніторингу. DJI Mini 2, завдяки своїм технічним характеристикам і малій вазі, є перспективним інструментом для початкових та локальних моніторингових задач у агросекторі. Проте для комплексних і масштабних завдань фахівці рекомендують застосування професійних безпілотників з розвиненими мультиспектральними й автономними системами. Подальший розвиток технологій взаємодії роїв БПЛА та вдосконалення алгоритмів обробки даних сприятиме більшій автономності систем і зниженню ролі оператора у полі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Муравйов О.В. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автоматизації БПЛА для сільгоспмоніторингу. — Київ : КНЕУ, 2023. — Режим доступу: https://ela.kpi.ua/items/a4fece99-9caa-44b8-a5cf-6696c24271d2 [pdf].

2. Кравчук А.Р. Аналіз методів автономної навігації БПЛА в умовах відсутності GPS сигналу. — 2025. — Режим доступу: https://ten.ztu.edu.ua/article/view/334764 [pdf].

3. Боровий В. Супутникове та БПЛА-знімання як інструменти моніторингу земельних ресурсів: сучасні технології та їх застосування в Україні. — 2025. — Режим доступу: http://tst.stu.cn.ua/article/view/330417 [pdf].

4. Пасічник Н.А. Використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу стану сільськогосподарських культур. — 2020. — Режим доступу: https://journals.uran.ua/bnusing/article/view/203933 [pdf].

5. DJI Mini 2 огляд та характеристики // Ek.ua, 2023. — Режим доступу: https://ek.ua/DJI-MINI-2.htm.

УДК 004.8:004.942

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ГІБРИДНІ МОДЕЛІ ПЕРЕДАЧІ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ У ВБУДОВАНИХ СИСТЕМАХ

Косенко В. В., магістрант, e-mail: vitalii.kosenko@nure.ua
Піскарьов О. М., к.т.н., доц., доц. каф. ЕОМ, e-mail: oleksii.piskarov@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Телеметрична передача інформації у вбудованих системах є однією з ключових задач сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів. З урахуванням зростаючих вимог до енергоефективності, надійності та оперативності обміну даними виникає необхідність адаптивних, гібридних моделей, здатних ефективно відповідати на виклики сучасних умов експлуатації сенсорних мереж.

Метою дослідження є розробка і обґрунтування інтелектуальних гібридних моделей передачі телеметричної інформації, що поєднують класичні підходи із можливостями машинного навчання та адаптивних алгоритмів для підвищення енергоефективності, надійності і якості збору даних у вбудованих системах.

Основні матеріали досліджень. У сучасних вбудованих системах для передачі телеметричної інформації широко застосовуються різні моделі збору та передачі даних, серед яких домінують періодична, подієва, on-demand та їх гібридні варіанти. Періодична модель передбачає регулярний збір даних із сенсорів через задані інтервали, що забезпечує послідовність, але іноді викликає надлишкове навантаження і швидке вичерпання енергетичних ресурсів пристроїв. Подієва модель активується при змінах у контрольованих параметрах, що дозволяє суттєво знизити енергоспоживання, адже трансляція даних відбувається лише за необхідності. On-demand модель працює на основі запитів із центрального або зовнішнього сервера і є найбільш енергоощадною, проте вимагає високого рівня доступності каналів зв’язку. Останні дослідження зосереджені на побудові адаптивних гібридних моделей [1], які поєднують переваги різних стратегій збору телеметрії. Зокрема, застосування кластеризації сенсорних вузлів дозволяє утворювати групи з автономним керуванням режимами передачі, адаптуючись до змінних умов експлуатації та стану батарей. Така гнучкість оптимізує ресурсоспоживання без втрати інформаційної повноти.

Методи машинного навчання мають значний потенціал для оптимізації та вдосконалення передачі телеметричної інформації у вбудованих системах. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє аналізувати великі обсяги різнорідних даних, виявляти приховані закономірності та закономірності, що допомагає прогнозувати наближення подій та визначати оптимальні моменти для передачі даних. Цей підхід істотно знижує енергоспоживання пристроїв і навантаження на мережу, що особливо актуально для ресурсомістких вбудованих систем з обмеженим енергозабезпеченням.

Однією з ключових задач є класифікація та прогнозування подій на основі історичних даних, для чого застосовуються різні методи, зокрема наївний баєсівський класифікатор, метод опорних векторів (SVM), випадкові ліси (Random Forest) та нейронні мережі. Ці методи дозволяють виявляти відхилення від нормального режиму роботи, прогнозувати критичні стани, що унеможливлює втрату важливої телеметричної інформації. Реалізація машинного навчання у вбудованих системах часто поєднується з адаптивністю моделей, де алгоритми самонавчаються на нових даних і коригують параметри режимів передачі в реальному часі. Це дозволяє підтримувати баланс між швидкодією, енергоспоживанням і точністю, що є критичним у телеметричних системах з автономним живленням. Загалом, методи машинного навчання створюють основу для інтелектуальної обробки та передачі телеметричних даних, надають гнучкість системам, підвищують їх надійність і сприяють розвитку сучасних вбудованих сенсорних мереж [2].

З технологічної точки зору, у вбудованих системах активно впроваджуються легкі протоколи передачі даних, які враховують обмежені ресурси пристроїв і забезпечують

ефективний та безпечний обмін телеметричною інформацією. Найбільш поширеними та перспективними є MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) і CoAP (Constrained Application Protocol). MQTT —протокол, розроблений спеціально для роботи в умовах мереж з обмеженою пропускною здатністю і невеликою обчислювальною потужністю клієнтів. Протокол відомий своєю простою архітектурою та низькими накладними витратами на передачу, що зменшує енергоспоживання і дозволяє працювати зі значною кількістю одночасних пристроїв. MQTT підтримує різні рівні якості обслуговування (QoS), що дає змогу балансувати між надійністю передачі та затримками. CoAP —протокол для обмежених пристроїв, орієнтований на режим запит-відповідь та легку взаємодію з HTTP, дозволяючи пристроям спілкуватися у межах IoT. CoAP використовує протокол UDP, що забезпечує мінімальні мережеві затримки й обмежує об'єм трафіку. Протокол підтримує механізми підтвердження передачі повідомлень [3], що підвищує надійність у нестабільних мережах. До переваг CoAP належить можливість роботи з групами пристроїв та використання функцій мультікасту, що ефективно для розподілених систем.

Особливу увагу слід приділяти заходам кібербезпеки, що є критично важливим для телеметричних систем. Необхідно застосовувати сучасні криптографічні алгоритми AES, RSA, ECC, а також протоколи захисту IPSec, TLS, що дозволяють забезпечити конфіденційність, автентифікацію і цілісність даних у процесі їх передачі [4].

Експериментальні дослідження показують, що поєднання MQTT з TLS-захистом і CoAP з процедурами аутентифікації створюють стійкі та енергоефективні системи передачі телеметричних даних, які здатні адаптуватися до умов перешкод і неоднорідності мережевих топологій, зменшуючи кількість втрат пакетів та покращуючи загальну якість обслуговування.

Таким чином, інтеграція легких протоколів передачі MQTT і CoAP разом із сучасними механізмами криптографічного захисту формує надійний фундамент для безпечної, оптимізованої та енергоефективної телеметрії у вбудованих системах [5]. Це дозволяє розширити сферу застосування таких систем у критичних галузях, зберігаючи баланс між продуктивністю та захистом інформації.

Висновок. Інтелектуальні гібридні моделі передачі телеметричної інформації відкривають нові перспективи у підвищенні ефективності вбудованих систем. Вони забезпечують баланс між енергоспоживанням, швидкодією передачі та якістю даних, одночасно підвищуючи гнучкість і надійність систем у різних сферах застосування. Подальші дослідження спрямовані на удосконалення алгоритмів прогнозування та інтеграцію із системами штучного інтелекту для автоматичного управління режимами збору та передачі телеметрії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лосєв С. О. Синтез пристроїв інформаційного контролю, які передають дані в діагностичну мережу пакетним способом. Problems and Perspectives in Management. 2018. Т. 16, № 4. С. 68–77. DOI: https://doi.org/10.21511/dm.16(4).2018.08

2. Піскарьов О. М., Абрамович Д. В., Плугін В. О. Застосування нейромереж та гібридних сховищ при створенні комп'ютерних систем. Інформаційні технології та суспільство. 2025. № 2(17). С. 141–149. DOI: https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.21

3. Ващенко О. В., Романюк В. В. Метод комплексної оптимізації енергозбереження та безпеки для технологій IoT. Вісник ТНТУ. 2025. № 2. С. 44–53. DOI: https://doi.org/10.31733/2659-8151.2025.2.44

4. Хмельовська Т. В., Романчук І. П. Методи машинного навчання у телеметрії вбудованих систем. Журнал сучасних технологій. 2024. № 3. С. 45–56. DOI: https://doi.org/10.12345/jst.2024.3.45 (якщо буде уточнення джерела)

5. Ергина М. В., Кузьменко І. І. Дослідження протоколів передачі даних в умовах Інтернету речей (IoT). Інтернет речей. 2022. № 1. С. 12–22. DOI: https://doi.org/10.12345/iot.2022.1.12 (потребує уточнення)

УДК 004.8:72(075.8)

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ У 3D-СЕРЕДОВИЩІ

Лєвтєров М. О., здобувач РВО молодший бакалавр, e-mail: star.pont.666@gmail.com
Москаленко М. М., викладач вищої категорії
Харківський фаховий коледж будівництва, архітектури та дизайну

Актуальність дослідження. У сучасному будівництві та архітектурному проєктуванні відбувається активний перехід від двовимірного креслення до тривимірного моделювання, що є ключовою складовою автоматизації проєктних процесів [1]. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність розробок, забезпечити узгодженість даних між різними спеціалістами, зменшити кількість технічних помилок і скоротити терміни реалізації проєкту. Актуальність дослідження полягає в тому, що поєднання технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) із засобами 3D-візуалізації відкриває нові можливості для створення комплексних архітектурно-інженерних моделей, які відображають не лише форму, а й функціональний зміст споруди [3].

Сучасні системи BIM, зокрема ArchiCAD, дозволяють автоматизувати більшість етапів проєктування будівельних об'єктів – від створення базової конструктивної моделі до розрахунків і формування креслень [1]. Однак для якісного представлення результатів необхідно поєднувати BIM-середовище з інструментами тривимірної графіки, такими як Autodesk 3ds Max [2]. Це дає змогу інтегрувати технічну точність інженерної моделі з фотореалістичною візуалізацією, що важливо як для демонстрації проєктів замовникам, так і для оцінки просторових і композиційних рішень.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу проєктування інженерних об'єктів шляхом використання автоматизованих засобів ArchiCAD і 3ds Max. Реалізація поставленої мети передбачала оцінку можливостей інтеграції цих програм, розробку тривимірної моделі будівлі з прилеглою територією, аналіз точності передавання даних і дослідження способів оптимізації робочого процесу.

Основні матеріали досліджень. Сучасне проєктування інженерних об'єктів базується на поєднанні архітектурного моделювання, структурного аналізу, ландшафтного планування та візуалізації в єдиному цифровому середовищі. Основна тенденція полягає в переході від двовимірних креслень до інтерактивних тривимірних моделей, які дозволяють створювати комплексні цифрові двійники об'єктів будівництва. Такі підходи забезпечують не лише точність геометрії, а й можливість автоматизації супутніх процесів – розрахунків, перевірок сумісності елементів, підготовки кошторисної документації та узгодження рішень між фахівцями різних спеціальностей. У процесі виконання дослідження було розглянуто повний цикл розробки інженерного об'єкта – від концептуального проєктування до створення реалістичної візуалізації.

На початковому етапі проєкт було розроблено в середовищі ArchiCAD, що дозволило створити архітектурну модель будівлі з детальною структурою приміщень, перекриттів, комунікацій та інших конструктивних елементів. ArchiCAD забезпечує параметричне моделювання, тобто зміну будь-якого параметра моделі з автоматичним оновленням усіх пов'язаних об'єктів і креслень. Це значно скорочує час розробки та мінімізує ймовірність помилок у проєктній документації. Після створення базової моделі будівлі архітектурні дані були експортовані у середовище Autodesk 3ds Max, де здійснюється подальше уточнення геометрії, накладання текстур, моделювання освітлення, візуалізація інтер'єрів і прилеглої території. 3ds Max дає змогу застосовувати фотореалістичні матеріали, симулювати природне освітлення, погодні умови та тіні, що дозволяє досягти високої точності візуального представлення проєкту. Завдяки використанню додаткових модулів V-Ray або Corona Renderer можливо створити повністю реалістичні зображення, а також відеоанімації, які імітують рух по території або навколо об'єкта. Такі інструменти є незамінними для демонстрації результатів замовникам і на етапах громадського обговорення проєктів.

В умовах сучасної цифровізації проєктів важливо, щоб архітектурна модель узгоджувалася з розрахунками опалення, вентиляції, електропостачання чи водопроводу. Для інтеграції тривимірних моделей з системами автоматизованого проєктування інженерних мереж (CAD/CAE) використовуються програмні комплекси, які підтримують обмін даними між різними системами BIM (Building Information Modeling), що дає змогу зберігати всю інформацію про його характеристики, матеріали, вартість і терміни реалізації об'єкта.

Іншим напрямом автоматизації є впровадження PLM-платформ (Product Lifecycle Management), які забезпечують наскрізне управління життєвим циклом об'єкта – від етапу проєктування до експлуатації. Вони інтегруються з CAD- і BIM-середовищами, підтримують спільну роботу інженерів, архітекторів та технологів у межах єдиної інформаційної бази, а також дозволяють здійснювати контроль версій моделей і документів, планування технічного обслуговування й аналіз змін. Наприклад, система Teamcenter забезпечує синхронізацію даних між конструкторськими відділами та виробничими підрозділами, тоді як ENOVIA підтримує 3D-досвід спільного проєктування в екосистемі 3DEXPERIENCE, що широко використовується у світовій авіаційній промисловості [2; 3].

Інтеграція ArchiCAD та 3ds Max у поєднанні з PLM-підходом створює нову якість у процесі проєктування: усі зміни в моделі миттєво відображаються в робочій документації, а візуалізація дає можливість аналізувати варіанти забудови до початку будівельних робіт. Крім того, використання 3D-моделювання забезпечує можливість попереднього оцінювання ергономічних характеристик території, оптимізації розміщення будівель і споруд, аналізу освітлення та затінення в різні пори року.

Автоматизовані системи дають змогу здійснювати віртуальні перевірки колізій – зіставлення різних інженерних систем для виявлення можливих конфліктів до початку фізичного будівництва. Це не лише економить ресурси, а й підвищує надійність майбутніх споруд. Для великих інженерних комплексів особливого значення набуває можливість створення цифрового двійника – інтерактивної моделі, яка відображає всі етапи проє ктування, монтажу, експлуатації та обслуговування. У подальшому такий цифровий двійник може бути інтегрований з системами моніторингу стану об'єкта, що відкриває перспективи для автоматизованого контролю параметрів та прогнозування технічного стану конструкцій.

Використання 3D-середовища для проєктування інженерних об'єктів дозволяє формувати нову парадигму роботи фахівців: замість послідовного переходу між етапами проєкту реалізується паралельна взаємодія різних спеціалістів. Архітектори, конструктори, інженери та дизайнери можуть працювати над однією моделлю одночасно, що підвищує узгодженість рішень і скорочує загальний термін реалізації проєкту. Завдяки цьому тривимірне моделювання сьогодні перетворюється на універсальний інструмент комплексного управління процесом проєктування, будівництва та експлуатації. Його ефективне використання сприяє створенню більш раціональних, безпечних і енергоефективних об'єктів, а також впровадженню принципів сталого розвитку в сучасну інженерну практику.

Висновок. Таким чином, автоматизація проєктування інженерних об'єктів у 3D-середовищі є важливим етапом цифрової трансформації будівельної галузі. Поєднання точності BIM-технологій із можливостями 3D-візуалізації забезпечує не лише технічну досконаліть, а й ефективність комунікації між усіма учасниками проєкту, сприяючи підвищенню якості архітектурно-будівельного процесу загалом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ArchiCAD 26. BIM modeling for architects and engineers: User Manual. – Graphisoft, 2022. – 430 p.

2 Autodesk 3ds Max 2023. Official Documentation. – Autodesk Inc., 2023. – 512 p.

3. Бердник, В. В. Комп'ютерне моделювання будівельних об'єктів: теорія і практика. – Київ: Наукова думка, 2021. – 256.

УДК 658.286:658.07:332.1

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИЧНИМИ ПОТОКАМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

Максименко О. С., студ.
Піскачова І. В., к.т.н., с.н.с., e-mail: piskachova@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасний агропромисловий комплекс (АПК) є стратегічною галуззю економіки України, проте його ефективність значною мірою обмежується недосконалістю логістичних процесів. Традиційні методи управління призводять до значних втрат продукції, які, за оцінками експертів, сягають 15–20% врожаю через проблеми зі зберіганням та транспортуванням. Розвиток цифрових технологій створює необхідність упровадження сучасних автоматизованих систем, здатних інтегрувати всі етапи виробничо-збутового ланцюга — від постачання сировини до реалізації готової продукції — в єдиний інформаційний простір. Це дозволить підвищити точність планування, зменшити операційні витрати та посилити конкурентоспроможність українських аграрних підприємств на світовому ринку [1, 2].

Метою дослідження є розробка та дослідження автоматизованої системи управління логістичними потоками в агропромисловому комплексі з використанням сучасних інформаційних технологій та методів автоматизації для оптимізації руху матеріальних, інформаційних та фінансових потоків.

Основні матеріали досліджень. Для досягнення поставленої мети було розроблено багаторівневу автоматизовану систему управління логістичними потоками (АСУ ЛП). В її основу покладено модульну архітектуру, що забезпечує гнучкість та масштабованість рішення. Структурно система складається з трьох ключових рівнів: нижній (польовий) рівень включає датчики (ваги, температури, вологості, RFID-мітки) та виконавчі механізми (конвеєри, приводи, клапани), що безпосередньо взаємодіють з матеріальними потоками; середній (контролерний) рівень реалізований на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) Schneider Electric Modicon TM241 (цей ПЛК виконує збір даних з польового рівня, обробляє їх та реалізує закладений алгоритм керування в режимі реального часу; програмування здійснюється в середовищі EcoStruxure Machine Expert [3], що підтримує стандарт IEC 61131-3); верхній (диспетчерський) рівень представлений SCADA-системою Citect SCADA 2018 [4], яка забезпечує візуалізацію технологічних процесів, моніторинг стану обладнання, архівацію даних та надає оператору інструменти для диспетчерського керування.

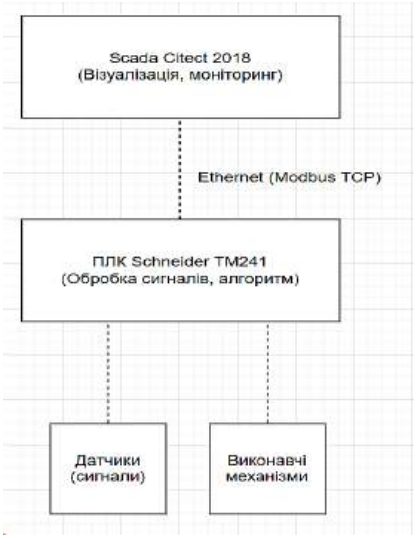


Рисунок 1 – Структурна схема автоматизованої системи управління логістичними потоками в АПК

Зв'язок між контролерним та диспетчерським рівнями здійснюється через промислову мережу Ethernet за протоколом Modbus TCP, що гарантує надійну та швидку передачу даних.

Основою функціонування системи є розроблений алгоритм управління, який реалізує таку послідовність дій (рис. 2):

Рисунок 2 – Узагальнений алгоритм управління логістичними потоками

Збір та обробка даних: отримання інформації з датчиків про стан потоків (кількість, місцезнаходження, параметри продукції).

Аналіз стану системи: визначення заповненості складів, доступності транспортних ресурсів та пріоритетів завдань.

Оптимізація та прийняття рішень: розрахунок оптимальних маршрутів переміщення, послідовності завантаження та розподілу ресурсів.

Формування та передача команд: генерація керуючих сигналів на виконавчі механізми (наприклад, запуск конвеєра, зміна напрямку руху).

Зворотний зв'язок та контроль: отримання підтвердження про виконання команд та коригування процесу в разі виявлення відхилень.

Такий підхід забезпечує адаптивне керування, що дозволяє системі оперативно реагувати на зміни зовнішніх умов та внутрішніх параметрів, мінімізуючи вплив людського фактора.

Висновок. У ході дослідження розроблено комплексну автоматизовану систему управління логістичними потоками в АПК, яка інтегрує сучасні програмні та апаратні засоби автоматизації. Запропонована архітектура та алгоритм управління забезпечують прозорість, керованість та ефективність логістичних операцій на всіх етапах виробничо-збутового ланцюга. Впровадження розробленої системи дозволить аграрним підприємствам суттєво зменшити втрати продукції, скоротити час виконання операцій та оптимізувати використання ресурсів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дніпровський державний аграрно-економічний університет: Головна сторінка. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/8660/1/23_Актуальні%20проблеми%20економіки,%20управління%20та%20маркетингу%20в%20аграрному%20бізнесі.pdf.

2. Agricultural Technologies as a Tool for Integrating Artificial Intelligence into the Agricultural Infrastructure of Ukraine / N. Linde et al. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. s30–s51. URL: https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr02.

3. Schneider Electric. EcoStruxure Machine Expert – Official Documentation [Електронний ресурс]. URL: https://www.se.com/ww/en/product-range/62098-ecostruxure-machine-expert/.

4. Citect SCADA. AVEVA – Global Leader in Industrial Software [Електронний ресурс]. URL: https://www.aveva.com/en/products/enterprise-automation-citect-expertise-services/.

УДК 004.4:681.518

ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ LINUX У ПРОМИСЛОВИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ (АСУ ТП)

Мамонтов М. О., здобувач РВО бакалавр, e-mail: mamontovmikita@gmail.com
Нечитайло Ю. А., к.т.н., доц., e-mail: nechitaylo@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Сучасні промислові підприємства характеризуються високим рівнем автоматизації технологічних процесів. Для керування технологічними лініями, енергетичними установками, транспортними системами та обладнанням дедалі ширше застосовуються автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП). Основною вимогою до таких систем є надійність, безперервність роботи та безпека оброблення даних. У цьому контексті операційна система Linux набула значного поширення як основа для розробки промислових контролерів, SCADA-систем, серверів реального часу та систем віддаленого моніторингу [1]. Її відкритість, стабільність і підтримка великої кількості апаратних платформ роблять Linux оптимальним вибором для впровадження у промислову інфраструктуру.

Метою дослідження є аналіз особливостей застосування операційної системи Linux у промислових автоматизованих системах керування (АСУ ТП), визначення її переваг, основних інструментів автоматизації та перспектив розвитку у сфері промислової інформатизації.

Основні матеріали досліджень. Операційна система Linux є універсальною, модульною та масштабованою платформою, яка може бути адаптована під різні вимоги автоматизованих систем керування. На відміну від комерційних ОС, Linux підтримує відкритий вихідний код і дозволяє гнучке налаштування ядра під специфічні апаратні архітектури, що робить її привабливою для промислових підприємств із різноманітними технічними вимогами. Можливість адаптації компонентів ядра та користувацького простору забезпечує стабільну роботу навіть на вбудованих пристроях із обмеженими ресурсами, таких як промислові контролери чи сенсорні вузли систем автоматизації. Однією з ключових переваг Linux у промислових умовах є реалізація систем реального часу (Real-Time Linux). Варіації ядра, зокрема PREEMPT_RT, або дистрибутиви на базі Debian RT, Ubuntu Core, Red Hat Enterprise Linux for Real Time, забезпечують мінімальну затримку виконання процесів і можливість пріоритетного оброблення подій. Це критично важливо для систем, що працюють із датчиками, приводами, сервомоторами та контролерами, де навіть мілісекундні затримки можуть вплинути на якість технологічного процесу або безпеку виробництва [2].

На базі Linux реалізуються численні промислові рішення:

- SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) – Ignition, OpenSCADA, EPICS, Rapid SCADA, які підтримують моніторинг, збирання даних і візуалізацію технологічних процесів у реальному часі;
- PLC-контролери, побудовані на вбудованих Linux-платформах (Raspberry Pi Industrial Compute Module, Siemens Simatic IOT2000, Advantech UNO, Wago PFC);
- системи віддаленого моніторингу та керування, які використовують промислові протоколи Modbus/TCP, OPC UA, MQTT, EtherCAT для обміну інформацією між рівнями виробничої інфраструктури.

Linux активно використовується в архітектурі промислового Інтернету речей (IIoT). Завдяки підтримці контейнеризації (Docker, Podman) та легких віртуалізаційних технологій (KVM, LXC) можливе створення масштабованих систем збору даних із тисяч сенсорів і виконавчих пристроїв. Адміністрування таких систем здійснюється за допомогою автоматизованих інструментів – Ansible, Puppet, SaltStack, які дозволяють віддалено конфігурувати вузли Linux, розгортати оновлення, контролювати працездатність компонентів мережі та централізовано керувати всією інфраструктурою.

Важливим чинником поширення Linux є можливість інтеграції з хмарними платформами та сервісами промислової аналітики. Дистрибутиви, оптимізовані для серверів – Ubuntu Server, CentOS Stream, AlmaLinux, SUSE Linux Enterprise – використовуються як основа для побудови приватних хмарних середовищ (OpenStack, Proxmox VE, CloudStack), що об'єднують різні рівні АСУ ТП. У таких системах Linux виступає не лише як операційне середовище, а й як інтеграційний шар, який забезпечує обмін даними між виробничими контролерами, базами даних і системами візуалізації. Це створює передумови для реалізації концепції "розумного заводу" (Smart Factory) у межах Industry 4.0.

Окрему роль відіграє підтримка стандартів кібербезпеки. Linux має широкий набір засобів захисту: міжмережеві екрани (iptables, nftables), системи контролю доступу (SELinux, AppArmor), сервіси журналювання та моніторингу подій (rsyslog, auditd), а також інструменти шифрування (GnuPG, OpenSSL, WireGuard). Вони дозволяють створювати багаторівневі політики безпеки, виявляти вторгнення (Snort, Suricata) та гарантувати надійність промислових мереж. Це особливо актуально для енергетики, транспортної логістики, нафтохімічної промисловості, де кіберінциденти можуть спричинити значні збитки. У рамках проведеного аналізу виявлено тенденцію переходу промислових підприємств на Linux як основну платформу для керування даними й технологічними процесами. Так, компанія Siemens активно впроваджує Linux у лінійці контролерів SIMATIC IOT2000, що виконують функції шлюзів між рівнями OT та IT-інфраструктури. Beckhoff використовує Unix-подібне ядро у системі TwinCAT/BSD, поєднуючи переваги FreeBSD і Linux для досягнення високої стабільності в реальному часі. Компанія Red Hat розробила спеціальну редакцію Enterprise Linux for Real Time, орієнтовану на оброблення критичних процесів у промислових системах.

Ще одним напрямом використання Linux є автоматизація життєвого циклу програмного забезпечення АСУ ТП. Завдяки інструментам безперервної інтеграції та доставки (CI/CD) – Jenkins, GitLab CI, Drone.io – можливо реалізовувати оновлення систем без зупинки виробництва, що підвищує ефективність підтримки та зменшує ризики простоїв.

Підприємства, які переходять на Linux-платформи, отримують не лише економічну вигоду від відсутності ліцензійних платежів, але й стратегічну перевагу у вигляді відкритої екосистеми. Це сприяє стандартизації програмних рішень, зменшенню залежності від конкретних постачальників і забезпечує сумісність із міжнародними стандартами промислової автоматизації – IEC 61131-3, OPC UA, MQTT, REST API, BACnet.

Отже, Linux перетворився на фундамент сучасних промислових інформаційних систем, що поєднують надійність, гнучкість і відкритість. Його роль у формуванні архітектури «розумних фабрик» постійно зростає, а інтеграція з технологіями штучного інтелекту, аналітики даних та кіберзахисту визначає перспективи розвитку промислових АСУ ТП у найближчі десятиліття [3].

Висновок. Операційна система Linux відіграє ключову роль у сучасних промислових автоматизованих системах керування. Її відкритість, модульність, підтримка систем реального часу й інструментів безпеки роблять Linux надійною основою для побудови масштабованих і гнучких рішень у сфері автоматизації. Застосування Linux у SCADA-, PLC- та IIoT-платформах сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів, зниженню витрат і забезпеченню стабільності роботи технологічних комплексів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Становлення та розвиток систем автоматизації на базі Linux / І. М. Коваль, С. П. Ляшенко // Автоматизація технологічних процесів і виробництв. – 2022. – № 3. – С. 45–50.

2. Linux Foundation. Industrial Linux and Real-Time Systems Overview. – 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.linuxfoundation.org/

3. Beckhoff Automation. TwinCAT/BSD and Linux Integration for Industrial Control Systems. – Beckhoff, 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.beckhoff.com/

УДК 004.942:004.415.25

АВТОМАТИЗОВАНА ПЕРЕВІРКА КРЕСЛЕНЬ У СИСТЕМІ AUTOCAD ЗА ДОПОМОГОЮ .NET API

Мартиненко О. В., здобувач РВО бакалавр, e-mail: oleekconder@gmail.com
Нечитайло Ю. А., к.т.н., доц., e-mail: nechitaylo@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У сучасному інженерному проєктуванні автоматизація процесів перевірки креслень набуває критичного значення, оскільки дозволяє накопичувати та повторно використовувати інженерний досвід і знання. Система AutoCAD є галузевим стандартом у сфері автоматизованого проєктування [2]. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення якості та відповідності проєктної документації встановленим стандартам. Під час колективної роботи над великими інженерними проєктами часто виникає ризик створення нових шарів або об’єктів, що не відповідають корпоративним або державним вимогам [1]. Такі відхилення можуть призвести до значних витрат часу й фінансових ресурсів на виправлення помилок на пізніх етапах розроблення. Ручна перевірка креслень є трудомісткою, потребує високої кваліфікації користувачів і детального знання стандартів САПР. Використання автоматизованих алгоритмів перевірки дає змогу гарантувати дотримання вимог, заповнення всіх обов’язкових полів основного напису та відповідність елементів корпоративним шаблонам. Додатковою перевагою є можливість автоматичного сповіщення користувача про порушення стандартів безпосередньо під час роботи над кресленням, що дозволяє усунути помилки одразу після їх появи. Для великих проєктів передбачено пакетну перевірку, яка дає змогу одночасно аналізувати кілька файлів і формувати узагальнений звіт у форматі HTML [4].

Метою дослідження є розроблення спеціалізованого програмного забезпечення, реалізованого у вигляді DLL-бібліотеки для платформи AutoCAD, що автоматизує процеси контролю та перевірки креслень на відповідність внутрішнім і галузевим стандартам. Для досягнення поставленої мети використовується функціонал AutoCAD .NET API, який забезпечує прямий доступ до структури даних креслення та дозволяє інтегрувати засоби контролю у робоче середовище проєктанта [2].

Основні матеріали досліджень. Для реалізації програмного забезпечення застосовано мову програмування C# на платформі .NET [2]. AutoCAD .NET API — це кероване середовище програмування, яке надає розробникам інструменти для взаємодії з даними креслень, автоматизації процесів і створення власних модулів, що розширюють базову функціональність системи. Розроблене програмне забезпечення побудоване за модульним принципом у вигляді DLL-бібліотек, які автоматично виконують заздалегідь визначені перевірки [2]. Такий підхід забезпечує високу гнучкість, масштабованість та простоту інтеграції у робочий процес AutoCAD. Загальна структура алгоритму роботи системи наведена на рис. 1.

Одним із ключових етапів автоматизованої перевірки є виявлення розмірних написів, у яких виконано ручне перевизначення тексту, оскільки такі елементи можуть не відповідати фактичним геометричним розмірам об’єктів. Для вирішення цього завдання використовується механізм Overrule API, що дозволяє перехоплювати та змінювати поведінку об’єктів у процесі роботи користувача. Хоча у .NET API відсутній вбудований метод Database.Audit [4], перевірку цілісності можна реалізувати за допомогою механізму обробки винятків (try/catch), реєструючи об’єкти, що викликають помилки під час доступу. Це дає змогу своєчасно виявляти пошкоджені або некоректні елементи креслення та запобігати порушенню структури даних. Файли стандартів оформлення (.dws) містять таблиці трансляції шарів, які зберігаються у вигляді розширених даних (XData). Читання таких файлів здійснюється аналогічно до .dwg-документів, але з іншим розширенням, а доступ до інформації забезпечується через застосунок ACLAYTRANS.

Рисунок 1 – Алгоритм автоматизованої перевірки креслення в CAD-системі

Для забезпечення стабільності бази даних AutoCAD API використовує Transaction Manager, який гарантує узгодженість усіх змін. Рекомендовано передавати транзакцію як аргумент у допоміжні функції, щоб уникнути жорсткої прив'язки до певного типу транзакцій. Не слід примусово переривати транзакцію (Abort()), якщо зміни в базі даних не виконувались, оскільки це може призвести до втрати узгодженості [3]. Також жоден тип транзакції не повинен бути активним під час виконання команд AutoCAD. Дотримання цих практик підвищує стабільність і надійність програмного забезпечення, що виконує автоматичну перевірку креслень.

Висновок. Дослідження підтвердило, що автоматизована перевірка креслень на відповідність стандартам є важливим чинником підвищення ефективності проєктування. Розроблене на основі AutoCAD .NET API спеціалізоване програмне забезпечення забезпечує:

- інтеграцію контролю стандартів безпосередньо у робочий процес [2];
- систематичний контроль якості й виявлення ручних перевизначень текстів розмірних написів;
- підвищену стабільність роботи завдяки коректному використанню транзакцій.

Упровадження таких систем дозволяє істотно скоротити час перевірки креслень, мінімізувати людські помилки й забезпечити сталість якості інженерної документації у великих проєктах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Autodesk. *AutoCAD 2023 Help: About Checking Drawings for Standards Violations* [Електронний ресурс]. – Сан-Рафаель, Каліфорнія: Autodesk, 2023. – Режим доступу: https://help.autodesk.com/

2. CMARIX. *AutoCAD API Development Using .NET: A Comprehensive Guide* [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: https://www.cmarix.com/blog/autocad-api-development-using-dotnet/

3. Stack Overflow. *Best Practices with Unit Testing on Third Party Software API's (AutoCAD)* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://stackoverflow.com/questions/autoCAD-unit-testing

4. Autodesk Forums. *How to Get an Audit Result from Any AutoCAD Drawing through API* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://forums.autodesk.com/t5/autocad-forum/

УДК 66.047:681.5:519.876

ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ ЗАВАНТАЖЕНОЇ СИРОВИНИ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ КАМЕРНИМИ СУШАРКАМИ

Мельник В. С., асп., e-mail: melnikvs@ukr.net
Смітюх Я. В., к.т.н., доц., e-mail: smityuh1@gmail.com
Національний університет харчових технологій

Актуальність дослідження. Камерні сушарки є одними з найбільш поширених типів установок для сушіння харчової, лікарської та сільськогосподарської сировини на малопотужних виробництвах або для сушіння високовартісної сировини. Такі установки вирізняються простотою конструкції, помірною вартістю та універсальністю у використанні, що робить їх привабливими для виробників харчових інгредієнтів, сушених фруктів, овочів і лікарських рослин.

Попри відносну простоту конструкції та експлуатації, процес сушіння в камерних сушарках залишається складним з точки зору керування. У ході сушіння змінюються характеристики самої сировини — її вологість, внутрішня структура, стан поверхні, теплофізичні властивості, що безпосередньо впливає на динаміку процесу. Крім того, умови перебігу сушіння та параметри об’єкта змінюються від циклу до циклу. Навіть для одного виду сировини істотно варіюються початкова вологість, розміри частинок, щільність укладки, маса завантаження, а також розподіл повітряних потоків у камері. Через це кожен цикл сушіння має індивідуальні особливості, що ускладнює роботу системи керування та знижує повторюваність результатів.

Більшість наявних систем автоматизації камерних сушарок реалізують лише програмне регулювання температури повітря за заздалегідь заданим профілем або підтримання постійної температури в камері. Такі системи не враховують фактичний стан матеріалу та не забезпечують стабільної якості готового продукту. Відсутність зворотного зв’язку безпосередньо від процесу сушіння часто призводить до отримання продукції недостатньої якості та перевитрати енергії. Разом з тим, значна частина таких виробництв функціонує за умов обмеженої наявності висококваліфікованого інженерного та технологічного персоналу. Обслуговування й налагодження систем керування здебільшого виконують оператори без спеціальної підготовки, а ремонти здійснюються силами самого підприємства.

Актуальним завданням є створення систем керування, які поєднують ефективність і простоту, є надійними в експлуатації та ремонтопридатними. Такі системи мають забезпечувати енергоефективність процесу та стабільну якість висушеної продукції, адаптуючись до змінних умов без необхідності втручання кваліфікованого персоналу. У цьому контексті доцільним є розроблення підходів до побудови систем керування, які використовують прості, надійні та інформативні вимірювальні сигнали без потреби у складних датчиках або експериментальних калібруваннях. Одним із таких напрямів є використання безпосереднього вимірювання ваги завантаженої сировини як додаткового інформативного сигналу для системи керування, що відображає реальний стан матеріалу в процесі сушіння.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності використання безпосереднього, безперервного вимірювання ваги завантаженої сировини як додаткового інформативного сигналу в системах керування процесом сушіння у сушарках камерного типу.

Основні матеріали досліджень. У більшості традиційних камерних сушарок керування процесом здійснюється за температурою повітря в камері. Такий підхід не враховує фактичний стан матеріалу, що сушиться, і не забезпечує адекватності контролю процесу сушіння. Найбільш інформативним сигналом міг би бути показник вологості самого продукту, однак практичне вимірювання цього параметра є складним, дорогим і ненадійним.

Вимірювання вологості безпосередньо в продукті супроводжується низкою технічних та організаційно-технологічних труднощів. Більшість промислових сенсорів чутливі до високої температури та хімічних речовин, що можуть міститися в сировині, потребують температурної компенсації, регулярного очищення та калібрування. Крім того, складно забезпечити повторюваність вимірювань між циклами сушіння, оскільки укладання сировини на сітках чи розташування сенсора на матеріалі може суттєво відрізнятися.

Альтернативним підходом є використання сигналу ваги як одного з інформативних сигналів системи керування. На відміну від температури, сигнал ваги відображає зміни, що відбуваються безпосередньо у продукті під час сушіння, тобто характеризує реальний хід процесу. Втрата ваги прямо пов'язана з випаровуванням вологи, тому аналіз ваги та її зміни дозволяє оцінювати фази процесу й інтенсивність сушіння [1].

Пропонується використовувати безпосередньо сигнал ваги, без перерахунку його у вологість. Перетворення ваги у вологість потребує точного знання початкової вологості, тому такий спосіб є неточним і обмеженим. Використання вагового сигналу у «сирому» вигляді дозволяє отримати простий та інформативний вимірювальний канал, який відображає реальний перебіг процесу сушіння, а не показники середовища в камері. Крім того, ваговий канал дозволяє проводити розрахунок і аналіз ефективності процесу сушіння, порівнювати партії, здійснювати об'єктивний облік сировини і готової продукції.

Використання тензометричних вагових сенсорів має низку практичних переваг. Такі датчики точні, малоінерційні, відносно недорогі, прості в установці та надійні в експлуатації, не потребують спеціального обслуговування, у разі несправності їх легко замінити без складного калібрування і переналагодження системи керування. Діючі сушарки можуть бути легко модернізованими із встановленням тензодатчиків. Такий підхід може бути впроваджений навіть у невеликих виробництвах, де важливими є надійність, стабільність, ремонтопридатність та прийнятна вартість.

Аналіз темпу зміни сигналу ваги дає змогу визначати ключові моменти процесу — перехід від етапу сталої швидкості до етапу падаючої швидкості сушіння, а також момент завершення процесу, коли вага стабілізується. Це створює можливість для автоматичного або адаптивного коригування режимів сушіння в реальному часі.

Ваговий канал може також бути інтегрований у багатопараметричні або інтелектуальні системи керування, які поєднують інформацію від кількох сенсорів — ваги, температури, потужності нагрівача, вологості та швидкості повітря. Це відкриває можливість створення систем із функціями самоналаштування, прогнозування та оптимізації, орієнтованих на підвищення енергоефективності та якості готової продукції.

Висновок. Безпосереднє використання сигналу ваги у системах керування камерними сушарками є практичним, простим і технологічно доцільним рішенням, яке може бути впроваджене без істотного ускладнення їх конструкції. Сигнал ваги є інформативною змінною, що відображає стан завантаженої сировини, а не умови середовища камери сушіння, тому його використання забезпечить більш адекватне керування процесом. Такий підхід дозволить відмовитися від фіксованих технологічних програм регулювання температури в камері та здійснювати керування відповідно до реального стану сировини і може суттєво покращити якість готової продукції, зменшити енерговитрати та підвищити повторюваність результатів. Ваговий вимірювальний канал може стати ключовим елементом адаптивних і інтелектуальних систем автоматизації процесів сушіння.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мельник В. С., Смітюх Я. В. «Дослідження зміни ваги сировини при перехідних процесах в конвективній сушарці» // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції "Цифрові технології в енергетиці і автоматиці" (ЦТЕА-2025), 6 червня 2025 р. – Київ: НУБІП, с. 90-91.

УДК 631.364.1

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЛІНІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МАКАРОНІВ

Михайлець К. А., магістр, e-mail: kirill990925@gmail.co
Абраменко І. Г., к.т.н., доц., e-mail: simba_aig@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. У світі все більш зростає попит на макаронні вироби, що зумовлено зростанням населення та зміною стилю життя. У зв'язку з цим, автоматизація виробництва може стати вирішальним фактором для забезпечення конкурентоспроможності підприємства та задоволення потреб споживачів.

В Україні на сьогоднішній день є велика кількість підприємств з виробництва макаронів, але проблема в тому що в основному виробництво відбувається на застарілому обладнанні. Це зменшує потужності виробництва, якість продукції і як наслідок продажі таких виробів доволі швидко падають.

Мета дослідження – модернізація автоматизованої лінія з виробництва макаронних виробів.

Основні матеріали досліджень. Автоматизована лінія виробництва макаронних виробів може складатися з різних етапів і компонентів в залежності від конкретної моделі та потреб виробництва. Однак, загалом, автоматизована лінія виробництва макаронних виробів може складатися з наступних компонентів:

Система змішування і перемішування інгредієнтів – силоси для зберігання інгредієнтів, система відважування, система змішування та перемішування інгредієнтів, яка забезпечує однорідність складу тіста.

Система формування тіста – преси для створення тіста з різними формами та розмірами.

Система різання – різальна машину, яка ріже тісто на певну довжину та форму.

Система сушіння – камера для сушіння тіста при певній температурі та вологості.

Система упакування – автоматична пакувальна машина, яка упаковує макаронні вироби в пакети або контейнери.

Система маркування – принтер для друкування дати виробництва, терміну придатності та інших інформаційних міток на упаковці.

Система контролю якості – датчики та системи контролю для вимірювання розміру, форми, ваги та якості макаронних виробів на різних етапах виробництва.

Автоматизацію виробництва прийнято ділити на три основних види: часткову, комплексну і повну. Перша означає, що частина функцій з виробництва продукту залишається у веденні людини, а частина здійснюється в автоматизованому режимі. Комплексна автоматизація виробництва характеризується управлінням виробничим процесом під керівництвом автоматизованих засобів, робочі тільки здійснюють контроль даної техніки і забезпечують безпеку і надійність роботи. Повна автоматизація надає право автоматичним засобам управління і контролю повністю взяти на себе управлінні виробничим процесом.

Макаронний прес призначений для замішування тіста, формування та різання макаронних виробів, що забезпечує повну автоматизацію технологічного процесу виготовлення макаронної продукції. В макаронної промисловості найбільш широке застосування отримали машини, формуючі тестові заготовки методом екструзії з шнеками.

Для приготування тіста використовують тістомісильну машину, до якої надходять інгредієнти у пропорції 1:3. Після чого відбувається заміс тіста впродовж 15–20 хвилин, тістомісильна машина підігріває тісто до 65 °С. Після того, як тісто замісили і воно має правильну консистенцію, відбувається вакуумування тіста з параметром тиску 10–40 кПа приблизно 5–7 хвилин. Усе надмірне повітря виводиться через витяжки.

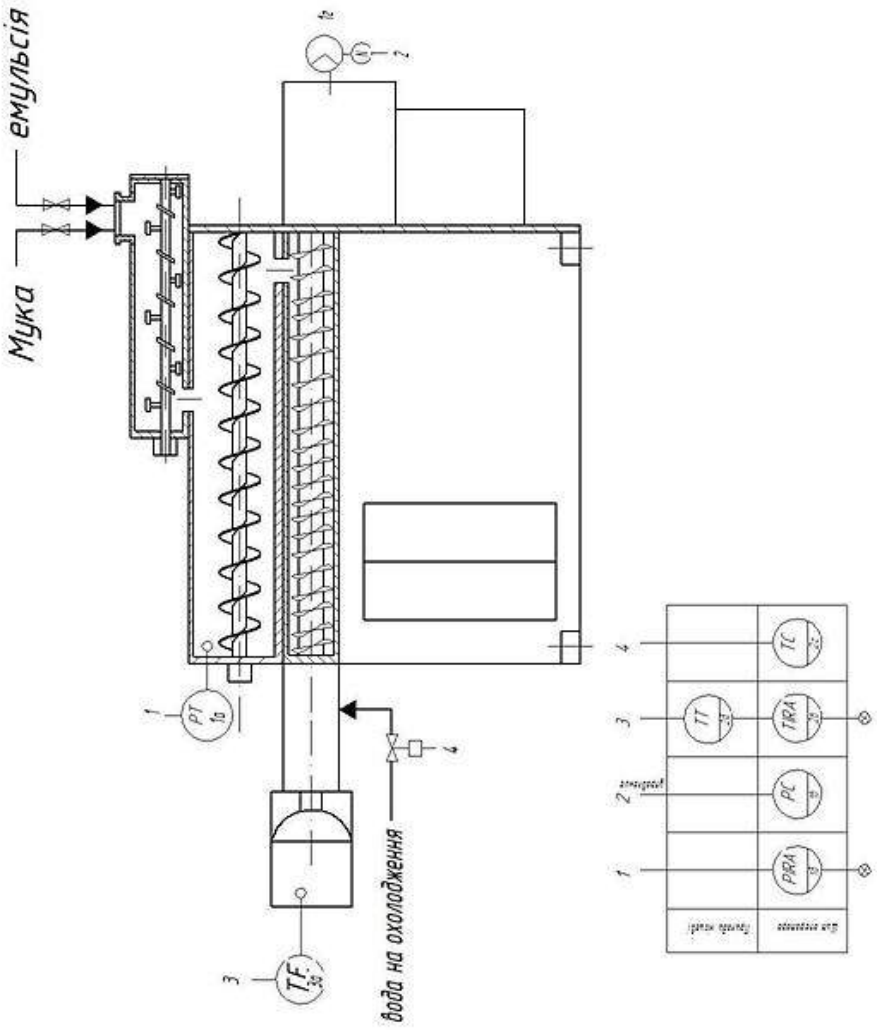


Рисунок 1 – Схема автоматизації макаронного екструдера

Готове тісто видавлюється через фільєру для того, щоб отримати макаронні вироби різної форми та розмірів. Зазвичай використовується екструзійне обладнання, наприклад макаронний прес або екструдер. Відбувається пресування тіста.

Після екструзії тісто надходить до спеціального нарізного обладнання, де макаронні вироби нарізаються до потрібної довжини.

Просушка макаронів відбувається у контрольованому середовищі для досягнення бажаного вмісту вологи. Для цього використовується спеціальна макаронна сушарка або дегідратор. Процес необхідно контролювати, щоб не допустити пересушування або недосушування макаронних виробів.

Висновок. У результаті аналізу предметної області було створено структурну схему виробництва, технологічну схему та функціональну схему автоматизації. Було сформовано ряд функціональних задач керування та відповідно створено контури керування: контур змішування інгредієнтів; контур приготування тіста; контур нарізки та просушки; контур охолодження, розфасовки та зберігання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ельперін І. В. Автоматизація виробничих процесів / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. - К: Ліра-К., 2015. - 378 с.

2. Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах / О. М. Пупена, І. В. Ельперін, Н. М. Луцька: Навч. посібн. – К.: Ліра-К, 2011. – 552 с.

УДК 004.8:004.942

ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ В ЗАСОБАХ МОНІТОРИНГУ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Муліка Я. В., магістрант, e-mail: yaroslav.mulika@nure.ua
Піскарьов О. М., к.т.н., доц., доц. каф. ЕОМ, e-mail: oleksii.piskarov@nure.ua
Харківський національний університет радіоелектроніки

Актуальність дослідження. Сучасні комп'ютерні системи характеризуються високою складністю, розподіленою архітектурою та великими обсягами даних, що створює значні виклики у забезпеченні стабільної продуктивності. Для підтримки ефективного функціонування інформаційної інфраструктури активно впроваджуються системи моніторингу, які здійснюють збір, агрегацію та аналіз показників ефективності. Водночас із зростанням складності таких систем зростає ймовірність появи аномальної активності — від хибних налаштувань програмного забезпечення до потенційних кіберзагроз. Виявлення аномалій у даних моніторингу є важливим завданням, оскільки дозволяє запобігати збоям, втратам продуктивності та несанкціонованим діям [1]. Основною проблемою є різноманітність типів аномалій, неоднорідність даних та необхідність масштабованих алгоритмів, здатних працювати в реальному часі.

Метою дослідження є розробка, аналіз та порівняння сучасних методів виявлення аномальної активності у процесі моніторингу продуктивності комп'ютерних систем для підвищення їх надійності, безпеки та ефективності

Основні матеріали досліджень. Методи виявлення аномалій у засобах моніторингу продуктивності можна розділити на три основні групи: статистичні, машинного навчання та гібридні [2].

Статистичні методи ґрунтуються на аналізі відхилень поточних значень показників від встановлених норм або моделей розподілу. Найпростішим підходом є визначення граничних порогів, що задаються вручну або на основі історичних даних. Такі методи ефективні для стабільних систем із регулярними шаблонами навантаження, однак малопридатні для динамічних середовищ із високою варіативністю. Більш розвинені статистичні підходи використовують ковзні середні, екпоненційне згладжування, авторегресивні моделі (ARIMA), а також методи детекції викидів за допомогою стандартних відхилень або коефіцієнтів варіації. Їхньою перевагою є простота реалізації та інтерпретації результатів, тоді як недоліками стають обмеженість у контекстній оцінці та низька стійкість до нерівномірного навантаження.

Методи машинного навчання надають гнучкіші інструменти для виявлення складних аномалій шляхом аналізу великих масивів даних. Використовуються як алгоритми з учителем (класифікація на основі навчальних наборів), так і без учителя (кластеризація або автоенкодери). Серед поширених підходів з учителем застосовують SVM (Support Vector Machine), дерева рішень, градієнтний бустинг. Ці моделі вимагають попередньо маркованих даних — прикладів нормальної та аномальної поведінки системи. У практичних умовах це часто є обмеженням через відсутність репрезентативних зразків. Методи без учителя, навпаки, виявляють відхилення без заздалегідь визначених міток [3]. До найпопулярніших належать алгоритми Isolation Forest, DBSCAN, K-Means, а також глибинні нейронні автоенкодери, які навчаються на нормальних даних і виявляють аномалії за величиною похибки реконструкції. Такі підходи дають змогу автоматично адаптуватися до змін у поведінці системи й придатні для потокових даних.

Гібридні системи поєднують статистичні та інтелектуальні методи. Наприклад, базовий статистичний фільтр може попередньо очищати дані, після чого застосовується нейромережева модель для точнішої оцінки та контекстного аналізу. Сучасні платформи моніторингу, такі як Prometheus, Zabbix, Datadog або Grafana з модулями на базі машинного навчання, поступово інтегрують гібридні моделі, що дозволяє забезпечити як швидке реагування на критичні відхилення, так і глибоке аналітичне виявлення прихованих закономірностей.

Особливе значення має виконання аналізу в режимі реального часу. Потокові алгоритми повинні забезпечувати низьку затримку обробки з урахуванням обмежених обчислювальних ресурсів. Для цього використовують інкрементальні версії алгоритмів кластеризації, статистичні F-критерії.

Розповсюджені підходи до виявлення аномальної активності в телеметричних потоках комп'ютерних систем включають використання онлайн-версій алгоритмів Isolation Forest, які дозволяють в реальному часі ізолювати та ідентифікувати нестандартні ситуації навіть у великих масивах даних, алгоритмів на основі стохастичного градієнтного спуску, що оптимізують навчання моделей на рухомих вибірках і забезпечують гнучкість та адаптивність до змін середовища, а також механізмів адаптивного порогового контролю, коли порогові значення змінюються в залежності від поточної статистики спостережуваних параметрів, що підвищує точність детектування аномалій. Крім того, у сучасних інфраструктурах активно застосовують архітектури на базі потокових платформ, таких як Apache Kafka, Flink або Spark Streaming, які не тільки дозволяють масштабувати обробку телеметричних даних у реальному часі, а й розподіляти аналіз між численними вузлами кластеру, забезпечуючи відмовостійкість, підвищену продуктивність і можливість централізованого моніторингу та керування складними інформаційними системами [4]. Сучасні дослідження зосереджені на побудові систем моніторингу з компонентами штучного інтелекту, здатних до самонавчання. Такі сситеми враховують кореляції між процесами, вузлами чи контейнерами, що істотно підвищує точність виявлення складних інцидентів у хмарних середовищах.

Впровадження методів Explainable AI (EAI) у процеси виявлення аномальної активності дозволяє технічному персоналу отримувати зрозумілі пояснення щодо причин і механізмів виникнення виявлених аномалій, а не лише сам факт їх існування. Такий підхід суттєво спрощує пошук джерела проблеми, полегшує діагностику несправностей та скорочує час реагування на інциденти, що особливо цінно у складних хмарних або багатовузлових інфраструктурах. Крім того, прозорість роботи алгоритмів EAI сприяє підвищенню довіри до автоматизованих засобів моніторингу серед IT-спеціалістів, оскільки результати детектування можна підтвердити об'єктивними доказами та логікою прийняття рішень [5]. Використання EAI створює умови для постійного вдосконалення систем безпеки шляхом більш глибокої співпраці між людиною й штучним інтелектом.

Висновок. Виявлення аномальної активності у засобах моніторингу продуктивності є ключовим елементом побудови надійних і безпечних інформаційних систем. Традиційні статистичні методи забезпечують простоту і швидкодію, але не враховують складні кореляційні зв'язки. Методи машинного навчання дозволяють автоматизувати процес аналізу та підвищити точність виявлення, а гібридні підходи поєднують переваги обох напрямів. Подальший розвиток таких систем пов'язаний з інтеграцією інтелектуальних моделей у масштабовані платформи моніторингу та зростанням рівня автоматизації реагування на аномалії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey. ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41, No. 3. P. 1–58.

2. Ahmed M., Mahmood A. N., Hu J. A Survey of Network Anomaly Detection Techniques. Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. P. 19–31.

3. Laptev N., Amizadeh S., Flint I. Generic and Scalable Framework for Automated Time-Series Anomaly Detection. Proceedings of the 21st ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2015. P. 1939–1947.

4. Шевченко О. А., Кальченко О. В. Методи виявлення аномалій у даних моніторингу інформаційних систем. Вісник Харківського національного університету радіоелектроніки. 2021. № 2. С. 45–52.

5. Марків О. В., Сидоренко П. В. Використання методів машинного навчання для виявлення аномалій у потоках телеметричних даних. Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. Вип. 2 (68). С. 112–119.

УДК 631.364.1

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА

Новак М. В., магістр, e-mail: maximnovak02@gmail.com
Абраменко І. Г., к.т.н., доц., e-mail: simba_aig@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Виробництво зернових культур є найважливіший напрямок сільськогосподарського виробництва в Україні. В аграрному секторі економіки, воно є важливою складовою, що формує продовольчу, а у визначених межах і економічну, екологічну та енергетичну безпеку. У сільському господарстві гостро стоїть проблема заощадження енергоресурсів шляхом економного використання газу, топкового палива, мазуту та дизельного пального, яке використовується в зерносушарках. Сільськогосподарські машини, відомі як зерносушарки, здатні висушувати зернові культури до того, як вони потребують певного рівня вологості. Таким чином, розроблення автоматизованої системи для контролю температури сушіння є одним з найважливіших завдань. Зниження енергетичних витрат на сушку є головним завданням, коли ви створюєте нову систему автоматизації або удосконалюєте існуючі. Тому, створення універсальних методів, моделей та інформаційного забезпечення при керуванні зерносушарками різних типів та конфігурації є актуальною, розв'язання якої, забезпечує підвищення якості зерна та процесів керування при сушінні зерна в зерносушарках в умовах підприємства.

Мета дослідження – зменшення витрат енергії та підвищення якості зерна, шляхом раціонального керування сушки зерна у зерносушарці завдяки SCADA.

Основні матеріали досліджень. Зростання виробництва зерна у світі та в Україні призводить до зростання попиту на зерносушарки. За даними Міжнародної асоціації виробників зерносушарок IADA (International Association of Drying Apparatus Manufacturers), у 2023 році, в світі було встановлено 1,8 мільйона зерносушарок. Очікується, що цей показник зросте до 2,2 мільйона у 2024 році. У 2023 році в Україні було зібрано 13,2 мільйона тонна зерна, що на 25% більше, ніж у 2022 році. Цей показник є рекордним для України. Зростання виробництва зерна в Україні також веде до зростання попиту на зерносушарки.

Процес сушіння зерна є важливою операцією в сільському господарстві, спрямованою на усунення зайвої вологи з урожаю. Цей процес має ключове значення для забезпечення якості та збереження зерна в період його зберігання. Основна мета сушіння – це досягнення оптимального рівня вологості, запобігання розвитку мікроорганізмів, таких як цвіль і гниль, та збереження поживних властивостей зерна.

Вибір зерносушарки є важливим завданням для будь-якого аграрного підприємства. Від правильного вибору залежить ефективність сушіння зерна, а також якість і збереження його товарних властивостей. Основні вимоги при виборі зерносушарки можна розділити на дві групи: технічні та експлуатаційні:

Технічні вимоги:

- тип зерносушарки – на ринку представлено зерносушарки різних типів: конвеєрні, шахтні, карусельні, модульні, мобільні та інші. Кожен тип має свої переваги та недоліки, які слід враховувати при виборі;
- продуктивність – визначається об'ємом зерна, який вона може висушити за одиницю часу. Продуктивність повинна відповідати потребам господарства;
- витрата палива та енергії – є важливим економічним показником у зерносушарці. При виборі слід звертати увагу на енергоефективність зерносушарки;
- якість висушеного зерна – залежить від багатьох факторів, зокрема від типу зерносушарки, її конструкції та режиму сушіння.

При виборі слід звертати увагу на показники якості висушеного зерна, які гарантує

виробник. Експлуатаційні вимоги:

- надійність та довговічність – зерносушарка є дорогим обладнанням, тому важливо, щоб вона була надійною та довговічною. При виборі слід звертати увагу на матеріали, з яких виготовлена зерносушарка, а також на її конструкцію.

- експлуатаційні показники – включають в себе: розміри, вагу, складність монтажу та обслуговування.

При виборі зерносушарки слід враховувати особливості конкретного господарства.

Централізована система керування сушінням зерна – це інтегрована система, яка забезпечує контроль і управління процесом сушіння усією зерносушаркою чи мережею сушарок з одного центрального пункту. Ця система дозволяє централізовано налаштовувати, спостерігати та керувати параметрами сушіння, які можуть включати температуру, вологість, вентиляцію та інші аспекти процесу.

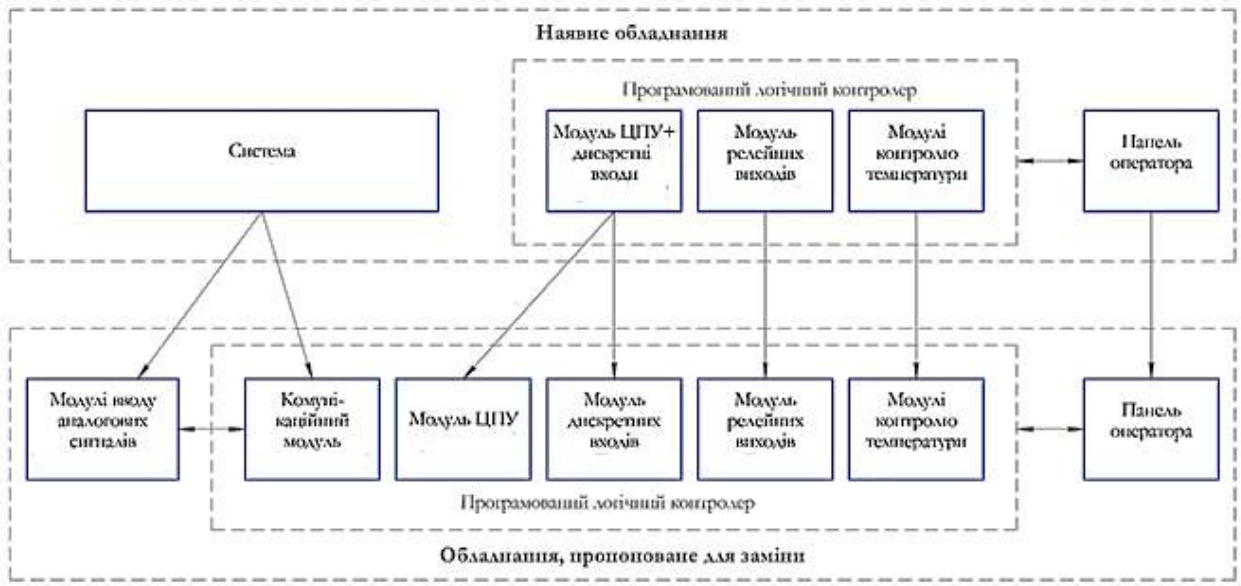


Рисунок 1 – Загальна схема централізованої системи керування сушінням зерна

Система складається з трьох рівнів, На першому рівні знаходяться виконавчі механізми та аналогові датчики. Пальник зерносушарки є механізмом управління. Другий рівень обробляє дані першого рівня, записує технологічні параметри та готує їх для передачі на третій рівень. Датчики передають інформацію на другий рівень, який складається з мікропроцесорного контролера, який має модулі вводу та виводу даних. Управління – це третій рівень. Це комп'ютерний контролер (панель управління) оператора. Оператор може керувати технологічним процесом і показувати стан технологічного обладнання в зручному для перегляду та аналізу форматі, такому як графіки, перелік подій.

Висновок. На основі аналізу технологічного процесу розроблено алгоритм керування сушіння зерна в зерносушарці, який наведеній в структурній блок-схемі, також ця схема реалізує код програми, для виконавчих вузлів цієї схеми, а саме для ПЛК, датчиків температури, та пульта управління.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздєв О. В. та ін./ За редакцією О.В. Дацишина.–Вінниця: Нова книга, 2008.–488 с.

2. Автоматизовані системи контролю і керування процесами зернопереробки на млинах /Горбенко В. М., Денисенко В. М., Рюмшин М. О. Соболевський В. Ю. – К.: Техніка. 2005. – 188 с.

УДК 631.364.1

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ СУХОГО МОЛОКА

Підгайний Д. Р., магістр, e-mail: danylo.pidgainyi@gmail.com
Абраменко І. Г., к.т.н., доц., e-mail: simba_aig@ukr.net
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Для прискорення темпів розвитку переробної промисловості необхідна розробка нових і вдосконалення існуючих технологій і обладнання та їх реалізація. Недосконаліть сушильної техніки відбивається на якості готової продукції, що отримується в результаті сушіння, створює додаткові технологічні труднощі при дотриманні режимів сушіння і призводить до збільшення собівартості продукту. Переважною тенденцією при автоматизації сучасних промислових об'єктів є впровадження ієрархічно розподілених систем керування на основі новітніх технологій з використанням контролерів та допоміжних засобів, які об'єднуються в багаторівневі системи управління. Створення і впровадження таких систем у виробництво включає декілька етапів: проектування, монтаж, наладка і експлуатація.

Мета дослідження – удосконалення системи автоматизації процесом сушки молока.

Основні матеріали досліджень. Вирішальними критеріями ефективності технічного процесу сушіння молока є вологість повітря (основний показник якості кінцевого продукту) і продуктивність по вихідному продукту. Остання досягається шляхом регулювання температури гарячого повітря від вбудованого нагрівача сушарки. Джерелом теплопередачі для калорифера є перегріта пара від парогенератора.

Підвищення температури повітря, що надходить в сушильну башту, обмежується ризиком псування (або пожежі) сухого молока, а зниження температури призводить до збільшення витрати теплоносія на одиницю випареної вологи.

Основними завданнями системи керування процесом сушіння молока є:

- збір та обробка інформації;
- заємодія із ПЛК, давачами та виконавчими механізмами;
- візуалізація технологічного процесу;
- автоматизоване регулювання температури повітря на вході, підтримка температури на заданому рівні на виході із сушильної вежі.

Для реалізації технологічного процесу сушки молока пропонується програмно-апаратний комплекс, структура якого представлена на рисунку.

Для рішення даних завдань пропонується використати автоматизовану систему керування технологічним процесом, що має ієрархічну трирівневу структуру.

До нижнього рівня відносяться датчики й виконавчі механізми; до середнього рівня – промисловий контролер ICP CON 8837 фірми ICP DAS, до верхнього рівня оперативного керування – АРМ оператора, реалізоване на базі персонального комп'ютера.

Функціями АРМ є:

- забезпечення цілодобового обміну інформацією з контролером;
- обробка отриманої інформації, формування баз даних вимірів, а також передісторії поточних подій;
- відображення отриманої інформації у вигляді таблиць і мнемосхем з можливістю показу як повного переліку параметрів, так і параметрів по конкретній технологічній підсистемі;
- побудова графіків тенденцій розвитку технологічного процесу;
- дистанційне керування устаткуванням;
- формування і друкування звітних та облікових документів [14].

Рисунок – Структура ієрархічної системи

До систем стабілізації нижнього рівня входять пристрої збору інформації (датчики температури, тиску, вологості), задатчики параметрів процесу (температура, тиск, вологість), система автоматичного контролю стану обладнання, програма керування, яка повинна реалізувати формування керуючих впливів з витрати перегрітої пари для підтримки заданої температури контактного газу на виході на заданому технологічному рівні. Система керування має протиаварійний захист та блок переводу до ручного режиму керування, виконавчі пристрої – електрозасувки.

Схема автоматизації сушарки передбачає контроль температури в камері, контроль та регулювання тиску пари в трубопроводах, наявність продукту, що подається в сушильну камеру, програмне керування циклом сушіння, місцеве та дистанційне керування електродвигунами.

Сушильна вежа у верхній частині має циліндричну форму, а нижня частина – форму конуса. Пристрій розпилення 3 встановлено вгорі камери. Розпилюючий диск приводиться в рух від електродвигуна М1 через редуктор спеціальної конструкції.

Висновок. На основі аналізу особливостей процесу розроблено систему керування процесом вироблення сухого молока. Розроблена система автоматично регулює температуру сушильного апарату керуючись сигналами датчиків температури і вологості з використанням програмованого логічного контролера ICP CON 8837, складено відповідні структурна, функціональна та принципова схеми.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Машкін М. І., Париш Н. М. Технологія виробництва молока і молочних продуктів: Навч. видання. – К.: Вища освіта, 2006. – 351 с. 26. Новаленко Н. О., Семко Т. В. Контроль молочної сировини при виробництві сухого молока / Збірник ВНАУ сільськогосподарські науки. – 2011. - № 6 (46). – С. 155 – 158.

2. Технологія молочних продуктів: підручник / Г. Є. Поліщук, О. В. Грек, Т. А. Скорченко та ін. – К. : НУХТ, 2013. – 502 с.

УДК 681.07

ЗАДАЧА РОЗРОБКИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РІДИНИ ПРИВОДУ ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНИМИ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Плугіна Т. В., к.т.н, доц., e-mail: plutan2016@ukr.net
Кузьминих В. В., магістр, e-mail: vasylkuzma@ukr.net
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Актуальність дослідження. Функціонування робочих органів багатьох машин здійснюється за рахунок гідроприводу та системи контролю робочої рідини. Система гідроприводу призводить до руху виконавчі механізми. Якість виконання робочих операцій, а також параметри експлуатації й показники ефективності залежать від якості робочого середовища приводу. Тому розробка інтелектуальної системи контролю робочої рідини приводу обладнання є актуальною задачею.

Метою дослідження є підвищення ефективності управління приводом робочого обладнання за рахунок розробки інтелектуальної системи контролю рідини на новій елементній базі.

Основні матеріали досліджень. Аналіз існуючих системи контролю робочої рідини приводів сформував вимоги до розроблювальної системи: вимірювання складу рідини; аналіз даних; сигнал тривоги; контроль очищення – вмикання фільтра, насоса; зберігання даних (аналізу тенденцій). У першу чергу робоча рідина в гідроприводі є носієм енергії, який забезпечує передачу останньої від джерел енергії (двигуна) до виконавчих механізмів. Вимоги щодо робочої рідини: необхідні мастильні властивості; редагування в'язкості при зміні температури і тиску; інертність щодо конструкційних матеріалів деталей гідроприводу; оптимальна в'язкість; щільність; мала токсичність; антикорозійні властивості; довговічність. Необхідно підібрати такі елементи системи контролю, щоб забезпечити наведені вимоги.

Одним з елементом контролю робочої рідини в системі управління є діагностичний інтелектуальний датчик гідравлічної системи.

За допомогою інтелектуального датчика виміряні дані можуть фіксуватися в інформаційних системах збору, обробки, відображення та архівації інформації, а також служити для автоматичної зміни параметрів в програмній частині системи управління. Основним елементом інтелектуальної системи діагностики стану гідроприводу є нечіткий контролер, який генерує правила, наповнює базу знань типовими випадками подій, що відбулися, і випадками аварійного або екстремального стану роботи гідравлічної системи. Він також здатний приймати рішення про доцільність зміни програми роботи гідроприводу (наприклад скорочення часу переходу з одного крайнього положення золотника в інше). Нечіткий контролер працює на основі лінгвістичних змінних, які в свою чергу прив'язані до реальних, точних значень вимірюваних значень в гідравлічній системі.

Оптимізація може бути досягнута виключно за рахунок використання комбінації інтелектуальних датчиків і програмного модуля нечіткого аналізу. Постає задача вибору відповідних сучасних компонентів системи автоматизації з лінійки можливих. В дослідженні пропонується використовувати метод багатокритеріальної оцінки та оптимізації для вирішення завдань прийняття рішень при виборі компонентів системи контролю рідини.

Необхідно розробити математичні моделі вибору сенсорів, контролеру керування та фільтру системи контролю чистоти робочої рідини гідросистеми. На рисунку 1 наведено математичні моделі, показники, критерії та обмеження вибору сенсору контролю рідини.

Розроблені математичні моделі є універсальними, відносяться до дискретного програмування з булевими змінними, можуть бути адаптовані до будь якого типу компонентів системи управління, що обирається. Оцінюючи сигнали з сенсорів якості рідини, контролер формує управлінський сигнал на пристрій гідравлічних виконавчих механізмів, призначений для впливу на властивості середовища шляхом фільтрації. В якості пристрою для очищення рідини використовують гідравлічні фільтри.

Показник	критерії	обмеження
Дальність	$A = \max \sum_{i=1}^{i'} A_i^M \cdot x_i;$	$\sum_{i=1}^{i'} A_i^M \cdot x_i \le A_{зад};$
Оглядовість	$O = \max \sum_{i=1}^{i'} O_i^M \cdot x_i;$	$\sum_{i=1}^{i'} O_i^M \cdot x_i \le O_{зад};$
Потужність	$P = \min \sum_{i=1}^{i'} P_i^M \cdot x_i.$	$\sum_{i=1}^{i'} P_i^M \cdot x_i \ge P_{зад}.$
Безпека	$ОП = \max \sum_{i=1}^{i'} ОП_i^M \cdot x_i;$	$\sum_{i=1}^{i'} ОП_i^M \cdot x_i \le ОП_{зад};$
Вага	$ВГ = \min \sum_{i=1}^{i'} ВГ_i^M \cdot x_i.$	$\sum_{i=1}^{i'} ВГ_i^M \cdot x_i \ge ВГ_{зад}.$
Вартість	$B = \min \sum_{i=1}^{i'} B_i^M \cdot x_i.$	$\sum_{i=1}^{i'} B_i^M \cdot x_i \ge B_{зад}.$

Рисунок 1 – Показники, критерії та обмеження вибору сенсору контролю рідини

Проведено аналіз видів гідравлічних фільтрів для розроблюваної системи контролю чистоти робочої рідини. За технічними характеристиками обираємо потрібний тип фільтра (рис. 2).

Характеристики і розміри

Модель	Пропускна спроможність, л/хв	Приєднувальна різьба (A)	Довжина (H), мм	Зовнішній діаметр (B), мм	Сторона A/F, мм	Байпасний клапан	Ступінь фільтрації, мкм
STR0502BG1M90P01	20	1/2"	79	52	30	Так	90
STR0651BG1M90P01	25	1/2"	110	65	41	Так	90
STR0653BG1M90P01	40	3/4"	144	65	41	Так	90
STR0704BG1M90P01	80	1"	141	70	41	Так	90

Рисунок 3 – Вибір фільтра

Висновок. Дослідження підтвердило, що кореляція впливу якості робочого середовища на надійність гідроприводу є великою. Забрудненість спричиняє інтенсивний знос та погіршення характеристик. У деяких випадках для керування гідроприводом застосовується вхідний сигнал у вигляді електричного, що має малу потужність. Тоді необхідно застосовувати відповідні перетворювачі цього сигналу в механічний. Перетворення має дати вихідний сигнал з такими параметрами, що забезпечать рух золотника сервомеханізму. Датчик контролю чистоти рідин повинен забезпечувати вимірювання чистоти рідини у відповідності з нормами ДСТУ або ІСО. Блок управління гідророзподільником забезпечує включення/вимикання блоку додаткової очистки задля досягнення заданого рівня концентрації забруднень. Така система забезпечує вимірювання швидкості зміни класу чистоти рідини та інформує про ступінь зносу виконавчих механізмів гідравлічної системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Створення основ теорії передачі енергії робочими рідинами в динамічних системах приводів машин: монографія / Л. Є. Пелевін, І. І. Назаренко, Є. В. Горбатюк та ін. – Київ: Аграр Медіа Груп, 2014. – 144 с. : іл. – Бібліогр.: с. 139-143 (57 назв). – ISBN 978-617-646-272-9.

2. Петров Е. Г., Новожилова М. Ф., Гребеннік І. В. Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах. Київ.: Техніка, 2004. 256 с.

3. Болкуневич В.О. Підвищення стійкості системи керування робототехнічною системою: дис. КПІ Ім. Ігоря Сікорського, 2019. С.79.

4. Дудюк Д.Л., Мазепа С С. Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси. Навч. пос. Рек. МОН. – К: Ліра, 2021. – 278 с.

УДК 131.1

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ YOLOV8 ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В СИСТЕМАХ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Тимчук С. О., д.т.н., проф., e-mail: s.tymchuk@itp.sumdu.edu.ua
Сумський державний університет
Демченко К.В., к.т.н., доц., e-mail: yayaska31@gmail.com
Чуб І. М., к.т.н., ст. викл., e-mail: chub.irina.nik@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Застосування автоматизації в процесі очищення стічних вод має дві основні функції: збір даних та контроль процесу [1]. Тисячі змінних, які збираються в режимі онлайн в системах SCADA очисних споруд, та аналіз даних є стандартними компонентами процесу очищення та контролю якості. Управління технологічними процесами очищення стічних вод доводиться здійснювати в умовах інформаційної невизначеності, пов'язаної зі складністю перебігу біохімічного процесу. Складність очищення полягає в тому, що задовільну роботу біореакторів необхідно забезпечувати в умовах постійно змінюваних експлуатаційних параметрах (зміна складу і об'єму стічних вод тощо). За даних обставин застосування традиційних методів управління не є достатньо ефективним. Нестабільність біологічної системи, якою складно керувати, зумовлює складність регулювання біологічних процесів у цих системах [2]. За умов постійного надходження стічних вод керування очищенням є надзвичайно складним завданням, а наявні системи моніторингу не дають змоги здійснювати прогнозування й регулювання цього біологічного об’єкта. Метод біоестимації є найбільш придатним для розв’язання цього завдання. Раніше розроблений метод контролю та прогнозування біоценозу мікроорганізмів активного мулу в процесі біологічного очищення стічних вод називається біоестимацією. Складність визначення біоестиматорів є головною проблемою під час використання цієї методики, оскільки застосування біоестимації пов’язане з необхідністю проведення складних мікробіологічних досліджень. Модель YOLOv8 обґрунтовано використати як основу програмного забезпечення для розпізнавання біоестиматорів у активному мулі. Її застосування дає змогу автоматизувати процес ідентифікації, що суттєво полегшує визначення порогових значень та подальше використання результатів. У цьому контексті нейронні мережі виконують функцію аналізу й розпізнавання біоестиматорів, а також забезпечують прогнозування змін у мікробній біоті активного мулу.

Метою дослідження є розробка та апробація моделі автоматичного розпізнавання біоестиматорів активного мулу для підвищення ефективності моніторингу стану біологічного очищення стічних вод у режимі реального часу, а також створення компонента комп’ютерної системи підтримки прийняття рішень щодо управління процесом очищення стічних вод з урахуванням оцінки якості роботи біологічної очистки за допомогою біоестимації. Основним завданням дослідження є створення інтелектуального інструменту, який здатний ідентифікувати морфологічні об’єкти (біоестиматори) на мікроскопічних зображеннях активного мулу, забезпечуючи тим самим своєчасну оцінку стану біопроцесів та можливість адаптивного керування системою очищення. Потрібно розробити програмний модуль для автоматичного розпізнавання біоестиматорів активного мулу на основі нейромережевої моделі YOLOv8 для автоматизованої обробки мікроскопічних зображень, що підвищить точність, швидкість і стабільність контролю біоестиматорів у системі очищення стічних вод.

Основні матеріали дослідження. Для розпізнавання біоестиматорів у зразках активного мулу використано модель YOLOv8, що поєднує високу швидкість обробки з високою точністю виявлення мікрооб’єктів. Особливістю YOLOv8 є одноетапний підхід до виявлення, що значно пришвидшує аналіз зображень у порівнянні з багатокроковими методами. Завдяки anchor-free механізму, оптимізованому Python-пакету та можливості швидкого перенавчання, модель легко адаптується до специфічних задач мікробіологічного аналізу [3]. Оскільки серед стандартних варіантів моделей YOLOv8 не існувало такої, що

була б адаптована для розпізнавання біоестиматорів, виникла необхідність розробити власну модель, орієнтовану на специфіку мікроскопічних зображень та особливості класифікації біоестиматорів активного мулу. З цією метою було проведено навчання моделі YOLOv8, спрямоване на ідентифікацію та локалізацію двох типів біоестиматорів. На рис. 1 показані результати роботи навченої моделі YOLOv8, яка виконує детекцію двох мікроорганізмів на мікроскопічних зображеннях активного мулу.

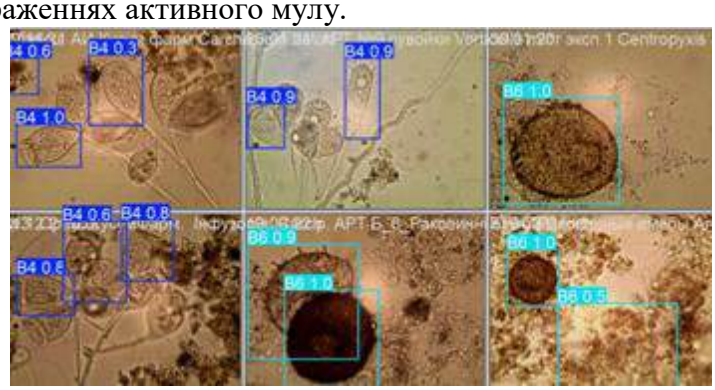


Рисунок 1 – Результати роботи з навчання моделі, що розробляється

У процесі навчання моделі YOLOv8 для розпізнавання було отримано узагальнені результати, які відображають динаміку зміни функцій втрат (loss) та метрик точності й повноти. Аналітичний аналіз результатів свідчить, що модель YOLOv8 демонструє стабільну збіжність функцій втрат під час навчання (train/box_loss, train/cls_loss, train/dfl_loss), що підтверджує ефективне наближення до цільового простору ознак. На валідаційній вибірці (val/box_loss, val/cls_loss, val/dfl_loss) спостерігалися незначні флуктуації, зокрема підвищення значення val/cls_loss у проміжку 15–25 епох, однак наприкінці тренування відзначено загальну тенденцію до зменшення втрат, що вказує на здатність моделі до узагальнення. Таким чином, імовірність правильного розпізнавання біоестиматора, зазаначимо що це для обмеженої вибірки, при його виявленні становить близько 60–70%**,** що є задовільним результатом для тестових умов. З огляду на отримані показники, модель YOLOv8 можна вважати придатною для використання як базового інструмента автоматичної ідентифікації біоестиматорів, із потенціалом подальшого підвищення точності шляхом збільшення обсягу навчальної вибірки, балансування класів і застосування технік донавчання. Треба зауважити, що метрики навчання наведені вище будуть незадовільними при використанні у промислових умова та наведені виключно у демонстраційних цілях.

Висновок. Проведене дослідження підтвердило ефективність використання архітектури глибокої нейронної мережі YOLOv8 для автоматизованого розпізнавання біоестиматорів активного мулу. Модель продемонструвала здатність точно ідентифікувати та локалізувати біоестиматори на мікроскопічних зображеннях. Таким чином, інтеграція YOLOv8 із методом біоестимації створює підґрунтя для розробки інтелектуальних систем моніторингу у біологічному очищенні стічних вод, здатних адаптивно регулювати технологічні параметри процесу очищення в реальному часі. Подальші дослідження варто спрямувати на розширення навчальної вибірки, оптимізацію параметрів донавчання та впровадження моделі у промислові системи підтримки прийняття рішень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Haluza A., Shtepa V., Yushenko V. Development of control and forecasting system for the effective functioning of biological wastewater treatment plants in the city of Vitebsk based on neural networks // Herald of Polotsk State University. Series F: Civil Engineering. Applied Sciences. – 2023. – No. 35(3). – P. 2–10. – DOI: 10.52928/2070-1683-2023-35-3-2-10.

2. Moldovan A., Nuca I. Automation of Wastewater Treatment Plant // 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), 9–11 October 2019, Craiova, Romania. – IEEE, 2019. – DOI: 10.1109/SIELMEN.2019.8905867.

3. Dziadosz M., Majerek D., Łagód G. Microscopic Studies of Activated Sludge Supported by Automatic Image Analysis Based on Deep Learning Neural Networks // Journal of Ecological Engineering. – 2024. – Vol. 25, No. 4. – P. 360–369. – DOI: 10.12911/22998993/185317.

УДК 641.53:534.321.9

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ

Черв'як І. В., студ.
Піскачова І. В., к.т.н., с.н.с., e-mail: piskachova@btu.kharkiv.ua
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Хлібопекарська галузь є стратегічно важливою для продовольчої безпеки України. Однак багато підприємств досі використовують традиційні методи керування, що базуються на ручному контролі, який призводить до нестабільності якості продукції, перевитрат сировини та енергоресурсів. В умовах зростаючої конкуренції впровадження сучасних автоматизованих систем керування (АСК) є ключовим фактором для підвищення ефективності виробництва, забезпечення стабільної якості та зниження собівартості продукції.

Метою дослідження є розробка та дослідження комплексної автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва хлібобулочних виробів, яка б забезпечила оптимізацію всіх етапів, зменшення впливу людського фактора та підвищення загальної ефективності підприємства.

Основні матеріали досліджень. В основі дослідження лежить розробка трирівневої автоматизованої системи [1, 2], що охоплює всі ключові етапи виробництва: від підготовки сировини до пакування готової продукції.

– Нижній (польовий) рівень – складається з датчиків (температури, вологості, ваги, рівня) та виконавчих механізмів (дозатори, мішалки, конвеєри, нагрівальні елементи).

– Середній (контролерний) рівень – центральним елементом є програмований логічний контролер (ПЛК) Schneider Electric Modicon TM251. Програмування логіки керування виконано в середовищі EcoStruxure Machine Expert, що відповідає міжнародному стандарту IEC 61131-3 [3].

– Верхній (диспетчерський) рівень – реалізований на базі SCADA-системи Citect SCADA 2022 [4], яка забезпечує візуалізацію процесів, моніторинг, збір та архівування даних, а також надає оператору інструменти для диспетчерського керування.

Рисунок 1 – Основні етапи технологічного процесу

Ключовим елементом системи є розроблений алгоритм керування, що реалізований на ПЛК і працює за принципом скінченного автомата, де кожен стан відповідає певному технологічному етапу (рис. 1).

Алгоритм забезпечує:

– Точне дозування компонентів згідно з обраною рецептурою.

– Керування процесом замішування з регулюванням швидкості через частотний перетворювач.

– Підтримку стабільних умов температури та вологості в камері ферментації за допомогою ПІД-регуляторів.

– Контроль температурних профілів у печі для досягнення оптимальної якості випікання.

– Рецептурне керування, що дозволяє швидко переналаштовувати лінію під різні види продукції.

Взаємодія між рівнями системи забезпечується через промислову мережу Ethernet за протоколом Modbus TCP, що гарантує надійний обмін даними в реальному часі.

Для створення інтерфейсів операторського керування використовується SCADA-система Citect SCADA 2022 (AVEVA),

яка виконує функції візуалізації, моніторингу, збору, архівування та аналізу даних [3, 4]. Вона забезпечує централізоване відображення параметрів технологічного процесу — температури, вологості, тиску, маси компонентів, швидкості конвеєрів тощо — у реальному часі. Citect SCADA 2022 підтримує сучасні протоколи зв'язку (Modbus TCP, OPC UA, MQTT), що дозволяє забезпечити стабільний обмін даними між контролером TM251 та операторською станцією.

Citect має розвинені інструменти створення графічних екранів, які дозволяють відображати стан кожного етапу технологічного процесу — від дозування сировини до пакування готової продукції. На екранах відображаються анімаційні елементи (стан виконавчих механізмів, рівні у ємностях, температурні графіки), кольорові індикатори станів (робота, очікування, аварія), а також кнопки ручного керування для операторів. Завдяки підтримці скриптів (Cicode) можливо реалізовувати розширену логіку керування, створювати діалогові вікна, формувати звіти та інтегрувати систему з базами даних SQL.

SCADA Citect 2022 виконує роль інтеграційного центру між усіма підсистемами виробництва. Вона збирає дані з ПЛК TM251, обробляє їх, зберігає у базі даних і надає інженеру або оператору зручні інструменти для аналізу. Архівні дані дозволяють відстежувати динаміку технологічних параметрів, формувати графіки температурних режимів, статистику споживання ресурсів та кількість вироблених партій. У разі виникнення аварійних ситуацій SCADA автоматично фіксує подію, зберігає її у журналі та подає звукову або візуальну сигналізацію оператору. Для забезпечення надійного обміну інформацією між контролером і SCADA-системою використовується протокол Modbus TCP, який є базовим для пристроїв Schneider Electric. У разі розширення системи або підключення обладнання інших виробників може бути реалізовано обмін даними через OPC UA, що дозволяє об'єднати різнорідні пристрої в єдину мережу.

Вибір апаратно-програмного комплексу Schneider Electric обумовлений високим рівнем інтеграції його компонентів. Середовище Machine Expert безпосередньо підтримує конфігурацію контролера TM251, його модулів вводу/виводу, комунікаційних інтерфейсів і параметрів обміну даними з Citect SCADA [4]. Такий підхід значно скорочує час розробки, спрощує діагностику та підвищує стабільність роботи системи.

Висновок. Розроблена автоматизована система керування дозволяє комплексно підійти до вирішення проблем сучасного хлібопекарського виробництва. Її впровадження забезпечує прозорість та керованість технологічного процесу, підвищує стабільність якості продукції та створює умови для оптимізації виробничих витрат. Практичні результати дослідження показують потенціал для скорочення виробничого циклу на 15–20 %, зменшення споживання енергії на 10–12 % та зниження кількості браку на 20–25 %, що підтверджує економічну доцільність впровадження подібних систем на підприємствах галузі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Хомич Л. В. Технологія хлібопекарського виробництва : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2021. 312 с.

2. Лапін О. М. Автоматизація технологічних процесів харчової промисловості : навч. посіб. Харків : ХНТУСГ, 2020. 288 с.

3. Schneider Electric. EcoStruxure Machine Expert – User Guide. Rueil-Malmaison : Schneider Electric SE, 2023. 156 с.

4. Овчаренко І. В. Системи SCADA у промисловій автоматизації : навч. посіб. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 224 с.

УДК 111.11

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНИХ СКЛАДОВИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ НАСОСНИМИ АГРЕГАТАМИ НАФТОСХОВИЩ

Чичкан А. Р., студ., e-mail: 4i4kanalina@gmail.com
Нечитайло Ю. А., д.т.н., проф., e-mail: nechitaylo@btu.kharkov.ua
Державний біотехнологічний університет

Автоматизовані системи керування насосними агрегатами нафтосховищ є критично важливими для забезпечення стабільного перекачування нафти та оптимізації енергоспоживання. Основними компонентами таких систем є частотно-регулюючі приводи (ЧРП), PID-регулятори та програмовані логічні контролери (PLC), наприклад, SIMATIC S7-1500. Динаміка рівня рідини в резервуарах описується нелінійним рівнянням dh/dt = (Q_in – Q_out)/A. Однак, зростаюча складність програмного забезпечення призводить до підвищення ризику збоїв, що може спричинити аварії, такі як перелив резервуарів, із втратами до 10% ресурсів. Актуальність дослідження полягає в аналізі надійності програмних складових та розробці методів їхнього вдосконалення для підвищення безпеки та ефективності нафтосховищ.

Метою роботи є аналіз моделей надійності програмного забезпечення систем автоматизації, оцінка типів помилок та обґрунтування методів підвищення надійності з урахуванням нелінійних характеристик процесу. Завдання включають вивчення впливу логічних, семантичних і синтаксичних помилок на стійкість PID-регуляторів, а також розробку рекомендацій щодо адаптивного налаштування та тестування.

Проведено аналіз моделей надійності, який виявив, що експоненціальні моделі (λ(t) = const), придатні для апаратних засобів, не ефективні для програмного забезпечення через його чутливість до логічних помилок. Використання моделі Джелінка-Морана (N(t) = N_0 * e^{-kt}) показало, що тестування в Simulink зменшує кількість дефектів на 70–80% після 1000 годин. Типи помилок класифіковано за ISO/IEC 25045: логічні, семантичні та синтаксичні. Рисунок 1 ілюструє графік інтенсивності відмов програмних і апаратних складових, де крива ПЗ спадає після 4 років експлуатації.

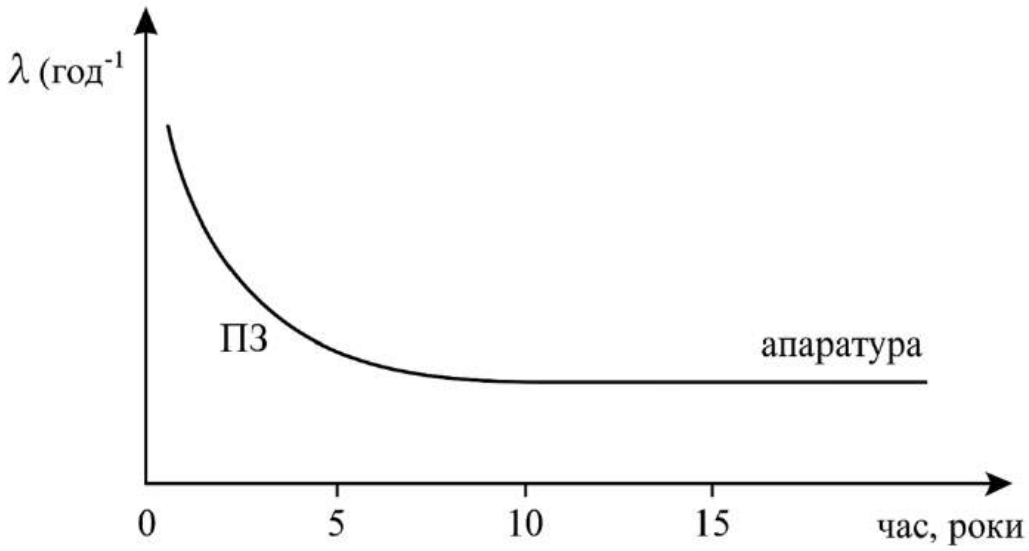


Рисунок 1 – Інтенсивність відмов програмних і апаратних складових

Для підвищення надійності запропоновано адаптивне налаштування PID (u(t) = Kp*e(t)* + +*Ki*∫e(t)dt + Kd*de(t)/dt) з урахуванням нелінійності Q = a*n^3 – b*nH та резервування каналів зв'язку (Modbus). Рисунок 2 показує блок-схему системи з дублюванням каналів.

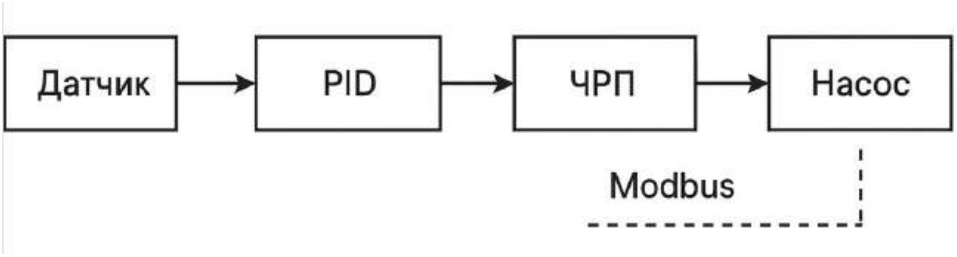


Рисунок 2 – Блок-схема системи керування з резервними каналами

Симуляції в Simulink підтвердили зниження ймовірності відмов на 20–30% та енергозбереження до 40%. Рисунок 3 відображає осциляції рівня через логічні помилки в PID.

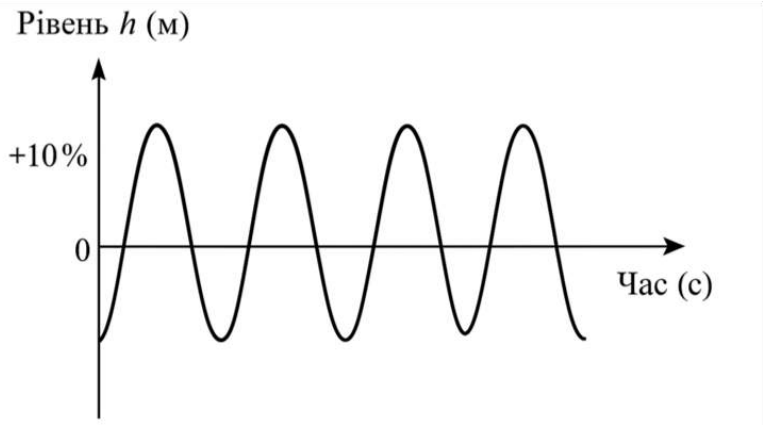


Рисунок 3 – Осциляції рівня через логічні помилки в PID

Дослідження підтвердило, що більшість відмов систем автоматизації пов'язані з помилками в програмному забезпеченні. Аналіз типів помилок обґрунтував необхідність прогнозування їхнього впливу на різних етапах життєвого циклу. Застосування адаптивного налаштування PID та HIL-тестування забезпечує надійність >99,9% і створює основу для подальшого вдосконалення систем керування нафтосховищ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Єремєєв І.С. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2022. 324 с.

2. IEC 61511: Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector. 2016. 100 с.

3. Jelinski Z., Moranda P. Software Reliability Research. IBM J. Res. Develop., 1972, V.16, P. 225-231.

4. ДСТУ ISO/IEC 25045:2016. Системи та програмне забезпечення. Продукт якості. Коди помилок. Київ: Держспоживстандарт, 2016. 45 с.

УДК 131.1

ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСІВ РІЖУЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

Чуб С. Г., к.т.н., ДП «Харківстандартметрологія»
Демченко К. В., к.т.н., доц., e-mail: yayaska31@gmail.com
Чуб І. М., к.т.н., ст. викл., e-mail: chub.irina.nik@gmail.com
Державний біотехнологічний університет

Актуальність дослідження. Розвиток сучасного машинобудування та приладобудування неможливий без впровадження гнучких виробничих систем (ГВС)**,** які забезпечують високу продуктивність, універсальність та можливість швидкої адаптації до змін у номенклатурі виробів. Однак упровадження ГВС потребує значних фінансових і матеріальних ресурсів, а ефективність їх використання визначається не лише технічними параметрами обладнання, а й рівнем організації управління ресурсами — насамперед ріжучими інструментами (РІ). Існуючі методи оцінювання стану РІ, що базуються переважно на часових показниках (мотогодинах), не враховують реальної інтенсивності роботи інструмента та особливостей обробки. Це призводить до невиправданих економічних втрат, зниження продуктивності та порушення стабільності технологічного процесу. Таким чином, актуальним є розроблення науково обґрунтованих методів кількісного оцінювання роботи РІ та прогнозування їхнього ресурсу, що дозволить підвищити ефективність експлуатації ГВС і забезпечити раціональне використання виробничих потужностей.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування методів точного оцінювання ресурсів ріжучих інструментів у складі ГВС для підвищення ефективності використання виробничих ресурсів. Для досягнення мети було поставлено такі задачі: як проведення класифікації різновидів обробки для верстатів типу «Оброблюючий центр», визначення критеріїв оцінювання роботи РІ для кожного різновиду обробки, розроблення чисельної процедури оцінювання обсягів обробки із застосуванням методу Монте-Карло, створення підходу до прогнозування витрат ресурсів РІ на основі функційного зв’язку між оцінками виконаної роботи та фактичним зносом.

Основні матеріали дослідження. У роботах провідних зарубіжних дослідників [1] ГВС розглядаються як найефективніший засіб організації сучасного виробництва, що дозволяє забезпечити гнучкість, автоматизацію та швидку переналагоджуваність. Подібні підходи відображені й у вітчизняних джерелах [2]. Водночас у [3] зазначено, що ГВС характеризуються значними первинними капітальними витратами, тому ефективне управління їхніми ресурсами має вирішальне значення. Серед підсистем, що входять до складу ГВС, важливе місце посідає автоматизована система інструментального забезпечення (АСІЗ), яка керує ріжучими інструментами [2], та система забезпечення функціонування (СЗФ) [5]. Однак у проаналізованих роботах відсутнє чітке визначення поняття «ресурси РІ» і не наведено методів їх точного обліку. Саме ці аспекти стали предметом даного дослідження. Методологічну основу дослідження становлять моделювання об’єктів і процесів механічної обробки та чисельні методи аналізу. Для оцінювання роботи ріжучого інструмента застосовано підхід, що базується на аналізі керуючих програм (КП) верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ). Виявлено, що основні типи обробки поділяються на: позиційну, що передбачає виконання точкових дій (наприклад, свердління); контурну, при якій інструмент безперервно переміщується по заданій траєкторії. Для позиційної обробки критерієм оцінювання прийнято кількість активних точкових дій, а для контурної обробки взята довжина шляху, пройденого інструментом, або обсяг (площі) обробленого матеріалу. Для визначення фактично обробленого об’єму, з урахуванням перетинань траєкторій, запропоновано застосування методу Монте-Карло, який дозволяє обчислити математичне очікування об’єму знятого матеріалу на основі послідовності випадкових випробувань. Це забезпечує можливість врахування реальної геометрії траєкторій

інструмента та складності обробки. Узагальнений алгоритм процедури розрахунку оброблюваного об'єму, який застосовує метод Монте-Карло, наведено на рис. 1.

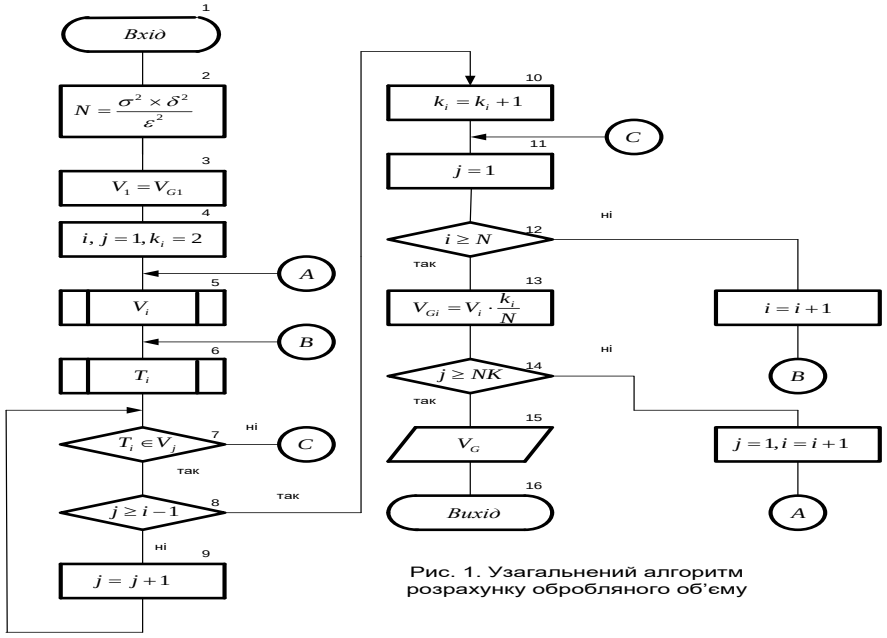


Рис. 1. Узагальнений алгоритм розрахунку обробляного об'єму

Розглянемо основні результати дослідження: виконано класифікацію процесів обробки для верстатів типу «Оброблюючий центр» на позиційну та контурну, для кожного типу обробки визначено кількісні критерії оцінювання роботи РІ, розроблено чисельну процедуру обчислення оброблюваного об’єму з використанням методу Монте-Карло, що дозволяє отримувати реалістичні оцінки з урахуванням складних геометричних перетинів. запропоновано алгоритм послідовного розрахунку оброблюваного об’єму, який може бути реалізований у вигляді програмного модуля автоматизованої системи управління ГВС, обґрунтовано можливість створення моделі прогнозування витрат ресурсів РІ, що базується на функційних зв’язках між оцінками виконаної роботи та ступенем фактичного зносу.

Висновок. ГВС є перспективним напрямом розвитку машинобудування, проте їх ефективність значною мірою визначається раціональним використанням ресурсів ріжучих інструментів. Розроблено інструментарій для кількісної оцінки роботи РІ, що враховує специфіку різних типів обробки. Запропонована чисельна процедура на основі методу Монте-Карло забезпечує можливість точного визначення фактично обробленого об’єму. Отримані результати створюють основу для побудови системи прогнозування витрат ресурсів РІ та підвищення ефективності функціонування ГВС.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. G. Manu, Vijay Kumar M, H. Nagesh, D. Jagadeesh. Flexible Manufacturing Systems (FMS), A Reviev. International Journal of Mechanical and Engineering Research and Development 8 (2): 323-336. April 2018.

2. Гнучкі виробничі системи для механічної обробки. Е.М. Гуліда та ін. Львів: Світ, 1992 – 152 с.

3. F. Frank Chen, Everett E. Adam, Jr. The Impact of Flexible Manufacturing Systems on Productivity and Quality. Article in IEEE Transactions of Engineering Management – March 1991.

4. Станочное оборудование ГПС. Справочник / под ред. Е.С. Пуховского. – К.: Высшая школа, 1990 – 175с.

5. Чуб С.Г. Проблеми атестації гнучких виробничих систем Стандартизація Сертифікація Якість. Науково-технічний журнал, 2005, №3, с. 41-45.

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

1. *Бахметьєв В. В., Жорняк Л. Б.*
Дослідження технічного та експлуатаційного стану мереж 10–35 кВ у контексті поточного функціонування енергосистеми..... 3

2. *Боровик Н. В., Боровик Д. О.*
Моделі та інструменти підтримки прийняття рішень для ефективного енергоменеджменту..... 5

3. *Бунько В. Я., Дарморіс П. М., Кондрат О. Я.*
Особливості застосування кабельних муфт холодної усадки для ліній електропередач середньої напруги та їх переваги..... 7

4. *Бунько В. Я., Глубіш А. С., Бунько Н. В.*
Аналіз використання мікропроцесорних терміналів релейного захисту нового рівня..... 9

5. *Вовк О. Ю.*
Компенсація несиметрії напруг мережі у трифазній системі шляхом штучної несиметрії в точках приєднання споживача..... 11

6. *Горюн О. О., Галько Т. І., Старенький В. П., Карпалюк І. Т.*
Використання генераторів на природному газі для резервного електропостачання в медичних установах..... 13

7. *Гурна І. І., Мірошник О. О.*
Економія електроенергії при користуванні холодильною технікою..... 15

8. *Дегтяр Я. Д., Зеленков Д. М., Карпалюк І. Т.*
Проблеми обліку електричної енергії при наявності локальних джерел енергії в однофазних споживачів..... 17

9. *Єрмак Д. А., Савченко О. А.*
Прогнозування товщини відкладення ожеледі на проводах повітряних ліній електропередавання..... 19

10. *Задерієнко С. І.*
Дослідження ймовірного складу автономних джерел електроенергії пункту незламності..... 21

11. *Засуха О. М., Дудніков С. М., Пазій В. Г.*
Обґрунтування необхідності впровадження автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії в сільських електромережах..... 23

12. *Козир М. В.*
Комплексний аналіз світлодіодних світильників із використанням моделювання та експериментальних досліджень..... 25

13. *Козловський О. А.*
Концептуальні засади побудови біоінспірованої ЕЕС..... 27

14. *Колесник А.І., Удовиця М. О.*
Автоматизована система керування світлодіодним освітленням на базі мікроконтролера..... 29

15. *Логвін В. В., Галько Т. І., Старенький В. П., Карпалюк І. Т.*
Аналіз електричної системи медичного закладу з метою розроблення рекомендацій щодо підвищення якості електропостачання..... 31

16. *Михайлова Л. М., Ягуп К. В., Горлачук М. А., Ягуп В. Г.*
Модифікована модель трансформатора для електроенергетичних систем..... 33

17. *Михайлова Л. М., Ягуп К. В., Горлачук М. А., Ягуп В. Г.*
Застосування нейронних мереж для визначення параметрів симетро-компенсувального пристрою системи електропостачання..... 35

18. *Пишний О. В., Павлюк Д. О., Карпалюк І. Т.*
Якість електричної енергії в мережі мегаполіса..... 37

19. *Попадченко С. А., Дудніков С. М.*
Заходи з підвищення надійності електропостачання в сучасних умовах..... 39

20. *Середа А. І., Дудніков С. М., Зубарєв Д. В.*
Компенсуючі пристрої для забезпечення якості електричної енергії..... 41

21. *Середа А. І., Тимченко В. П.*
Визначення впливу від відмов високовольтних вимикачів у сільських електричних мережах..... 43

22. *Середа А. І., Бондар С. О.*
Аналіз втрати активної та реактивної потужності в електричних розподільних мережах..... 45

23. *Сорокін М. С.*
Комунікаційні технології та інфраструктура розумної енергомережі Smart Grid..... 47

24. *Шаповалов Д. О., Трунова І. М.*
Забезпечення надійності електродвигунів технологічних процесів сільськогосподарського виробництва організаційними заходами..... 50

25. *Шрам О. А., Братковська К. О.*
Зменшення витрат на електроенергію шляхом маневрування навантаженням промислового підприємства..... 52

26. *Юрченко О. Ю.*
Фактори якісного монтажу електрощитового обладнання..... 54

27. *Ялама А. І., Дудніков С. М.*
Комплексний аналіз несиметрії електричних параметрів у сільських розподільчих мережах і технічні підходи до її компенсації..... 56

СЕКЦІЯ 2. ВІДНОВЛЮВАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА

1. *Братчиков О. С., Шевченко К. Ю.*
Напівпрозорі сонячні панелі: технології, застосування та перспективи розвитку..... 58

2. *Волобуєв А. С., Савченко О. А.*
Порівняльний аналіз методів прогнозування виробітку електричної енергії сонячними електростанціями..... 60

3. *Галько С. В., Галько Т. І., Зеленков Д. М.*
Сонячна електростанція на основі когенераційних фотоелектричних модулів із системою автоматичного стеження фотопанелі за сонцем..... 62

4. *Головко В. М., Бережнюк М. М.*
Моделювання й аналіз роботи двигуна стірлінга в умовах нестабільного надходження теплоти..... 64

5. *Гулевський В. Б., Постол Ю. О.*
Тепличне господарство та сонячна енергетика..... 66

6. *Дорошенко А. М., Коломієць Д. П., Серьогін О. О.*
Особливості безпечної експлуатації сонячних електростанцій із пошкодженими фотомодулями у прифронтових регіонах України..... 68

7. *Дяденчук А. Ф., Філіпович Є. В.*
Дослідження впливу метеорологічних умов на роботу фотоелектричної станції засобами Matlab..... 70

8. *Моголівець А. С., Дудніков С. М., Попадченко С. А.*
Майбутнє та можливості розвитку відновлюваної енергетики в аграрному секторі України..... 72

9. *Мотайло М. С., Мороз О. М.*
Системи зберігання енергії – інструмент підвищення стійкості енергетичної системи України та інструмент учасників ринку електроенергії..... 74

10. *Оберемок Д. О., Тоберт О. Ю., Оксенич Р. В.*
Вплив сонячних електростанцій та систем зберігання енергії на стабільність електричної мережі..... 76

11. *Оксенич Р. В., Мірошник О. О., Мороз О. М., Пазій В. Г.*
Дослідження алгоритмів управління MICROGRID у середовищі MATLAB/Simulink..... 78

12. *Павлов А. О., Мороз О. М., Мірошник О. О., Тоберт М. Ю.*
Динаміка будівництва сонячних електростанцій і установок зберігання енергії у світі та Україні..... 80

13. *Павлов А. О., Пазій В. Г., Мороз О. М., Мірошник О. О.*
Оптимізаційна економічна модель гібридної сонячної електростанції домогосподарства..... 83

14. *Поляк М. І., Дудніков С. М., Середа А. І.*
Перспективи використання сонячної енергетики в Україні..... 85

15. *Потапенко М. В., Рамш В. Ю., Шаршонь В. Л.*
Оцінка енергетичних характеристик фотоелектричних модулів з урахуванням впливу зовнішніх факторів..... 87

16. *Сорокіна Н. Ю.*
Стратегічна роль цифрового маркетингу в популяризації відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)..... 89

17. *Сотнік О. В., Мороз О. М.*
Дослідження характеристик установок зберігання енергії та алгоритмів їх керування при спільній роботі із сонячними електростанціями..... 92

18. *Тоберт О. Ю., Оберемок Д.О., Markowska Katarzyna, Kiełbasa Paweł, Мірошник О.О., Щур Т. Г.*
Проблеми реверсивних потоків потужності в мережах із ВДЕ та методи їх усунення..... 95

19. *Угарова А. Е., Ємельянова К. С.*
Аналіз ультрашвидких зарядних станцій електромобілів із підключенням до мереж 6–10 кВ..... 97

20. *Чумаченко С. М., Пісня Л. А., Антощенков Р. В., Черепньов І. А.*
Перспективи використання мікробних паливних елементів в умовах надзвичайних ситуацій..... 99

СЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА 101

1. *Братчикова О. В., Братчиков О. С.*
Малі роботизовані платформи («рої» роботів). Системи групового управління («роєм») для виконання комплексних завдань..... 101

2. *Бреславець Д. Р., Тукалов І. О.*
Оптимізація за критерієм енергозбереження електропривода летючих ножиць заготівельного стана 750/850/950..... 103

3. *Василенко Д. О.*
Алгоритмізація аналізу та використання гіперспектральних і машинних методів оцінювання якості молочних продуктів..... 105

4. *Вовк О. Ю.*
Енергозберігаюче регулювання напруги асинхронних двигунів у функції завантаження з урахуванням особливостей робочих машин 106

5. *Волков С. М., Чаусов С. В., Гузенко В. В.*
Розробка автоматизованої системи керування електроприводом шнекового дозатора..... 108

6. *Гузенко В. В., Патока І. О.*
Реалізація системи контролю температури двигуна в електроприводі змінного струму..... 110

7. *Гузенко В. В., Мальцев К. В.*
Етапи й закони процесу розвитку модулів робототехнічних систем із регульованим електроприводом..... 112

8. *Задорожня І. М., Суботін О. І.*
Аспекти синтезу систем автоматичного керування електроприводами технологічних машин методом стандартних поліномів із забезпеченням максимального демпфірування пружних коливань 114

9. *Зражевський І.О., Гузенко В. В.*
Важливість заходів з обслуговування електрифікованих асинхронних машин на зерноочисних комплексах 116

10. *Корецький А.С., Турчин В.Т., Горященко С.Л.*
Розробка автоматизованої системи контролю та керування електроприводом..... 118

11. *Кучинський К.А.*
Електромагнітні навантаження елементів ротора в пусковому режимі синхронних машин 120

12. *Міленін Д. М., Тютюнник В. О.*
Удосконалення електропривода конвеєрної установки для лазерної обробки інкубаційного яйця..... 122

13. *Осадчий С. І., Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Мірошніченко М. С.*
Ідентифікація динаміки оператора безпілотного літального апарата в стохастичних умовах..... 124

14. *Окушко О. В., Радько І. П., Наливайко В. А., Сорокін Д. С.*
Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування стану електродвигунів малої потужності на базі MICROGRID..... 126

15. *Попова І. О., Чаусов С. В.*
Архітектура пристрою захисту асинхронного двигуна 128

16. *Попова І. О., Чаусов С. В.*
Синтез алгоритму роботи захисного пристрою..... 130

17. *Саєнко Є. М., Гузенко В. В.*
Переваги використання електрокарів у сільському господарстві 132

18. *Семенов О. О., Лисиченко М.Л.*
Експериментальні випробування ультрафіолетової установки у свинарнику..... 134

19. *Синявський О. Ю., Савченко В. В., Ковальчук С. М., Сташко Н. М.*
Зміна кутової швидкості двигунів постійного струму послідовного збудження при відхиленні напруги..... 136

20. *Сотнік О. В., Курдяєв О. І.*
Підвищення енергоефективності електроприводів сільськогосподарських машин відцентрового типу шляхом використання перетворювачів частоти у складі автоматизованих систем керування..... 138

21. *Сотнік О. В.*
Використання програмного середовища MATLAB/Simulink при дослідженні електромеханічних систем в умовах воєнного стану в Україні 140

22. *Сухін В. В., Лисиченко М.Л.*
Термодинамічна ефективність лазерної обробки кореневої системи в установках гідропоніки..... 142

31. *Товт Ф. Ф.*
Розробка мультимодальної гібридної системи діагностики електроустановок на базі модульної архітектури..... 144

23. *Толканець А. А., Гузенко В. В.*
Розробка й дослідження регульованого електропривода центрифуги на цукровому заводі..... 145

24. *Хандола Ю. М., Гузенко В. В., Рогоза А.О.*
Автоматизація роботи твердопаливного котла для пекарської шафи 147

25. *Хандола Ю. М., Корольов А. О.*
Результати впровадження регульованого електропривода насосної станції для підвищення тиску води в багатоповерховому будинку 149

26. *Хандола Ю. М., Корольов А. О., Пащенко О. М.*
Аналіз технічних характеристик насосів для перекачування молочної продукції..... 151

27. *Чорна М. О., Буклей А. О.*
Дослідження автоматизованої системи керування електроприводом конвеєра для транспортування коренеплодів..... 153

28. *Чорна М. О., Кондрашов В. С.*
Розробка системи регульованого електропривода для тепловодопостачання тваринницької ферми..... 156

29. *Чорна М. О., Несміян Р. О.*
Розробка системи регульованого електропривода вентиляційної установки тваринницької ферми..... 158

30. *Шевченко П. С., Гузенко В. В.*
Порівняльний аналіз методів динаміки електромеханічних систем 160

СЕКЦІЯ 4. БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ 162

1. *Yevheniia Datsok, Olena Yakovleva*
Market research on mobile applications for medication management..... 162

2. *Natalia Kosulina, Boris Evstatiev*
Portable biosensor based on nanomaterials for express diagnostics of infections in farm animals..... 164

3. *Serhii Panchenko, Oleh Datsok*
Biomechanical justification of the shape of a human lower limb prosthetic foot..... 167

4. *Victor Shigimaga, Vitaly Sukhin*
Electrolytic model of conductivity of the cytoplasm of a biological cell..... 169

5. *Варданян К. А.*
Метод адаптивного кластерування та non-local means для очищення зображень комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії..... 172

6. *Власюк Д. А.*
Огляд сучасних методів ендоскопії 174

7. *Галушко Д. Є., Федоров В. М., Голляк О. Д., Смирний Д. О., Носова Т. В., Носова Я. В.*
Використання плантографії для діагностики стану діабетичної стопи 176

8. *Горбовий О. В.*
Використання 3D-друку в персоналізованій розробці протезів та ортезів для пацієнтів з обмеженими можливостями..... 178

9. *Денисов Б. Ю., Чорна М. О.*
Дослідження процесу взаємодії електромагнітного поля з садовими культурами..... 180

10. *Дубік В. М.*
Дослідження впливу індуктивності на навантажувальну здатність сонатрода..... 182

11. *Дьоміна Т. О., Лисиченко М. Л.*
Розробка математичної моделі поглинання потоку випромінювання лазера шкірою вимені корови..... 184

12. *Забродін К. Ю., Гелетка О. О.*
Методи автоматичної класифікації феноменів спонтанної ЕМГ..... 186

13. *Задорожна В. М., Лисиченко М. Л., Майборода О. В., Стегній Б. Т.*
Вплив лазерного випромінювання на клітини синьогнійної палички 188

14. *Кандауров І. В., Привалов Б. В., Аврунін О. Г., Сорока І. В., Шушляпіна Н. О.*
Використання назальних розширювачів для покращення респіраторно-ольфакторної функції..... 190

15. *Козак О. В.*
Комп'ютерний аналіз спекл-зображень як метод діагностики стану еритроцитів крові людини..... 192

16. *Корщіков А. М.*
Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування ефективності фізичної реабілітації..... 194

17. *Косулін С. В.*
Магнітно-керовані мікророботи для цільової доставки ліків 196

18. *Косуліна Н. Г., Павлова М. В.*
Інноваційна НВЧ-технологія для ресурсоефективної переробки тваринних відходів..... 198

19. *Косуліна Н. Г., Репешко С. А.*
Флуоресцентні системи для неруйнівного контролю якості насіння 200

20. *Косуліна Н. Г., Рибалка І. А.*
Методика контролю електромагнітного шуму/завад на агропромислових об'єктах..... 203

21. *Косуліна Н. Г., Турчак І. С.*
Оптимізація параметрів електричного поля для селективного ураження бур'янів..... 205

22. *Косуліна Н. Г., Шатило А. В.*
Дослідження ефективності різних типів електромагнітних полів для стимуляції схожості насіння хвойних порід..... 207

23. *Косуліна Н. Г., Шигимага В. О., Чорна М. О., Сухін В. В.*
Інформаційний аналіз ЕКГ-апаратів ветеринарної галузі застосування 209

24. *Косуліна Н. Г., Юрченко Ю. В.*
Вплив довжини хвилі інфрачервоного випромінювання на ефективність сушіння та якість сільськогосподарської сировини 211

25. *Косуліна Н. Г., Яковенко К. О.*
Використання ультразвуку як раннє попередження про погіршення мікроклімату у тваринницькому приміщенні..... 213

26. *Косуліна Н. Г.*
Етичні та термінологічні засади біомедичної інженерії: виклики та шляхи подолання..... 215

27. *Лавренко Д. С., Чорна М. О.*
Електромагнітна технологія підвищення врожайності ріпаку 217

28. *Ляшенко Г. А., Полянова Н. В., Федорченко І.*
Обґрунтування конструкції близькопольного радіометра для дослідження біологічних об'єктів..... 219

29. *Мамедов Д. В., Дацок О. М., Шушляпіна Н. О.*
Щодо методу аналізу впливу клінічних діагностичних показників під час захворювання на COVID-19..... 222

30. *Мартинюк Л. В., Кривоносов В. Є., Дацок О. М.*
Технічні вимоги до портативного пристрою для діагностики ішемії кінцівок в умовах бойових дій..... 224

31. *Мельник В. В., Лебединський О. Е.*
Оцінка основних факторів впливу на точність навігації при стереотаксичній радіотерапії..... 226

32. *Михайлов Б. В., Пісня Л. А., Півень Д. А., Черепньов І. А.*
Можливості електромагнітної терапії для лікування тривоги, паніки й посттравматичних стресових розладів в умовах надзвичайних ситуацій 228

33. *Окушко О. В., Ковтун П. М.*
Перспективні електротехнології виготовлення та ремонту електротехнічного обладнання у промисловості..... 230

34. *Пономаренко В. А.*
Методи та засоби первинної психологічної допомоги та реабілітації 232

35. *Савченко В. В., Синявський О. Ю., Шевченко О. О., Федик О. В.*
Обробка поливної води в полі коронного розряду 234

36. *Сокольцов А. О., Аврунін О. Г.*
Інтегровані цифрові технології в ринології: від обчислювальної медицини до цифрового двійника 236

37. *Терехов М. В.*
Інтелектуальні методи аналізу та прогнозування захворювань на основі відкритих біомедичних даних..... 238

38. *Щєпін В. В., Трушаков Д. В.*
Модернізація саморобного фізіотерапевтичного пристрою для корекції психоемоційного стану людини 240

СЕКЦІЯ 5. ІНТЕГРОВАНІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТЕПЛО- І ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ

1. *Петренко О. В., Смілик М. М.*
Аналіз та експлуатаційні характеристики сонячних адсорбційних холодильних систем 242

2. *Петренко О. В., Білецький Е. В., Єрмоленко Є. М., Єрмоленко О. В.*
Аналіз експлуатаційних переваг систем дистанційного моніторингу для підвищення енергоефективності холодильних систем 244

3. *Петренко О. В., Білецький Е. В.*
Методологія розрахунку коефіцієнта заповнення та обсягу ресивера холодильних систем 246

4. *Козін В. М., Подоляка С. А.*
Дослідження термоелектричної системи охолодження процесора 248

5. *Кушнір В. О., Яковлева О. Ю.*
Порівняльний термодинамічний аналіз природних холодоагентів для малих холодильних систем 250

6. *Мольський О. С., Мольський С. М., Потапов В. О.*
Застосування ежекційного принципу при заморожуванні 252

7. *Семенюк Д. П., Якушенко Є. М.*
Кондиціювання виробничих приміщень із підвищеним тепловим навантаженням 253

8. *Семенюк Д. П., Якушенко Є. М.*
Сучасний стан експорту морозива в Україні 255

9. *Семенюк Д. П., Петренко О. В., Якушенко Є. М.*
Основні перспективи розвитку холодильної та кліматичної галузі 257

10. *Семенюк Д. П., Ляхов Г. В.*
Стан, проблеми та перспективи будівництва сучасних фруктосховищ 259

11. *Потапов В. О., Білий Д. В.*
Аналітична модель кінетики екстракції зрідженими газами 261

12. *Потапов В. О., Смілик М. М., Ярмак Ю. М.*
Обґрунтування вибору акумуляторів теплової енергії для середньотемпературних холодильних камер 263

13. *Трандафілов В. В., Хмельнюк М. Г.*
Аналіз енергоефективності комбінованої CO_2-холодильної системи 265

14. *Цуркан М. М.*
Математичне моделювання процесу теплообміну в теплообміннику 267

15. *Яковлева О. Ю., Хмельнюк М. Г., Яковлев Ю. О.*
Холодильна підсистема «Виробництво» для холодового ланцюга та прогнозоване моделювання енергоефективності на основі AI..... 269

16. *Якушенко Є. М., Семенюк Д. П.*
Інноваційні стратегії сталого холодопостачання..... 271

17. *Якушенко Є. М., Семенюк Д. П.*
Інтеграція штучного інтелекту та інтернету речей для стійкого, енергоефективного та прогнозованого управління холодильними та кліматичними системами..... 273

18. *Якушенко Є. М., Семенюк Д. П., Петренко О. В.*
Інноваційні вектори розвитку холодильної та кліматичної техніки: від енергоефективності до інтелектуальних і стійких систем 275

19. *Яцьковський Т. Є., Горященко С. Л.*
Система для опалення побутових приміщень на основі фанкойла 277

20. *Zaruba H., Khmelniuk M.*
Study of potential binary natural mixtures of refrigerants with moderate temperature glide based on isobutane..... 279

СЕКЦІЯ 6. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

1. *Бовчалюк С. Я., Бовчалюк Н. І.*
Архітектура ПЛІС-контролера паралельної дії модульного типу 281

2. *Варваров В. В.*
Автоматизація інженерно-авіаційного забезпечення: програмні засоби та перспективи розвитку..... 283

3. *Гриб К. О., Сірик Д. М., Піскарьов О. М.*
Розробка розподіленої бази даних для автоматизованої системи керування виробництвом та системи віддаленого моніторингу: архітектурний синтез і сучасні підходи..... 285

4. *Деркач А. Є., Баськов Д. Р., Піскарьов О. М.*
Інтеграція мікросервісної архітектури в автоматизованих системах керування технологічними процесами та підтримки мікроклімату приміщень 287

5. *Єременко А. О.*
Розробка та дослідження автоматизованої системи керування мікрокліматом свинокомплексу в режимі реального часу..... 289

6. *Єрьоменко М. О., Єременко А. О., Піскачова І. В.*
Підвищення надійності автоматизованої системи керування виробничими процесами агропромислового комплексу..... 291

7. *Ісаєв О. С., Піскачова І. В.*
Розробка та дослідження автоматизованої системи вентиляції пташника 293

8. *Калітієвський В. М., Абраменко І. Г.*
Розробка та дослідження системи автоматизації лінії охолодження молока 295

9. *Караджаєв Д. Р., Тимчук С. О.*
Інформаційна технологія підбору конфігурації персональних комп'ютерів під потреби користувача..... 297

10. *Ковальчук Д. М.*
Проєктування інтелектуальної нечіткої системи контролю мікроклімату приміщень..... 299

11. *Ковальчук Д. М.*
Система прогнозування електроспоживання з використанням нейронних мереж..... 301

12. *Корнієнко С. В., Нечитайло Ю. А.*
Дослідження сучасних технологій навігації та автоматизації БПЛА для сільгоспмоніторингу..... 303

13. *Косенко В. В., Піскарьов О. М.*
Інтелектуальні гібридні моделі передачі телеметричної інформації у вбудованих системах..... 305

14. *Лєвтєров М. О., Москаленко М. М.*
Автоматизація проєктування інженерних об'єктів у 3D-середовищі..... 307

15. *Максименко О. С., Піскачова І. В.*
Розробка та дослідження автоматизованої системи управління логістичними потоками в агропромисловому комплексі..... 309

16. *Мамонтов М. О., Нечитайло Ю. А.*
Використання операційної системи Linux у промислових автоматизованих системах керування (АСУ ТП)..... 311

17. *Мартиненко О. В., Нечитайло Ю. А.*
Автоматизована перевірка креслень у системі AutoCAD за допомогою .NET API..... 313

18. *Мельник В. С., Смітюх Я. В.*
Використання безперервного вимірювання ваги завантаженої сировини в системах керування камерними сушарками..... 315

19. *Михайлець К. А., Абраменко І. Г.*
Розробка та дослідження системи автоматизації лінії виготовлення макаронів..... 317

20. *Муліка Я. В., Піскарьов О. М.*
Підходи до автоматизованого виявлення аномальної поведінки в засобах моніторингу інформаційної інфраструктури..... 319

21. *Новак М. В., Абраменко І. Г.*
Розробка та дослідження системи автоматизації процесу сушіння зерна 321

22. *Підгайний Д. Р., Абраменко І. Г.*
Розробка та дослідження системи автоматизації процесу виготовлення сухого молока..... 323

23. *Плугіна Т. В., Кузьминих В. В.*
Задача розробки системи контролю рідини приводу обладнання сучасними засобами автоматизації..... 325

24. *Тимчук С.О., Демченко К. В., Чуб І. М.*
Застосування нейромережевої моделі YOLOv8 для автоматизованої ідентифікації в системах біологічного очищення стічних вод..... 327

25. *Черв`як І. В., Піскачова І. В.*
Розробка та дослідження автоматизованої системи керування виробництвом хлібобулочних виробів..... 329

26. *Чичкан А. Р., Нечитайло Ю. А.*
Аналіз надійності програмних складових систем автоматизації керування насосними агрегатами нафтосховищ..... 331

27. *Чуб С. Г., Демченко К. В., Чуб І. М.*
Оцінювання ресурсів ріжучих інструментів у гнучких виробничих системах 333

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та мережному режимах

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ В АПК

МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

5 листопада 2025 р.

Відповідальні за випуск: *Ю.М. Хандола*,
О.О. Мірошник,
О.В. Петренко,
О.М. Жданович
Комп'ютерна верстка: *В. Пазій*,
В. Гузенко,
М. Чорна,
М. Смілик,
С. Литвиненко
Техн. редактор *Л.Ю. Кротченко*

Підп. до друку 5.11.2025 р. Об'єм даних 7,88 Мб.

Державний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, Харків, 61002