

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.317.318

DOI 10.20535/1813-5420.2.2025.327133

О.В. Коцар¹, канд.техн.наук, ORCID 0000-0002-7958-2335

С.С. Довгий¹, аспірант, ORCID 0009-0003-9428-7240

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ МСП ЧЕРЕЗ УПРАВЛІННЯ ДАНИМИ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ

За результатами понад 200 енергоаудитів енергетичних і промислових підприємств, комерційних компаній і побутових споживачів виявлено низку недосконалостей, зокрема, недостатнє використання потенціалу енергомоніторингу; незадовільну якість даних енергомоніторингу, зокрема, в частині їхньої повноти цілісності, достовірності та актуальності; відсутність належного аналізу даних про енерговикористання; неналежну формалізацію, уніфікацію та автоматизацію процесів енергомоніторингу; неврахування переваг регулярного технічного обслуговування енергоспоживаючого обладнання і відсутність контролю якості його проведення. Зазначені проблеми не дозволяють повною мірою використовувати потенціал систем енергетичного менеджменту та призводять до незадовільного рівня енергоефективності. Задля подолання прогалин в статті досліджено шляхи реалізації потенціалу систем енергомоніторингу і вдосконалення технічного обслуговування технологічного устаткування малих та середніх підприємств з метою формування вимог до систем енергомоніторингу і реалізації політики управління ефективністю використання енергії, оцінено потенціал діджиталізації енергомоніторингу, застосовано інтерпретування результатів енергомоніторингу із залученням сучасних інформаційних технологій, а також розглянуто прямі і непрямі вигоди від підвищення продуктивності систем енергетичного менеджменту. Бібл. 10. Рис. 2.

Ключові слова: електроенергія, енергетична ефективність, енергетичний менеджмент, енергоаудит, енергомоніторинг, МСП, технічне обслуговування.

Вступ. З метою оптимізації операційних витрат відчутна кількість українських компаній суттєво скоротила чисельність служб експлуатації, вивішивши працівників поза штат основної компанії або цілком поклавшись на аутсорсинг. За такого підходу у штаті компанії може залишатися лише 1-2 інженери, на яких покладено обов'язки із забезпечення надійної та безперебійної роботи електроустаткування, а також контролю за його технічним обслуговуванням (ТО) і ремонтом. Разом із неспростовними фінансовими вигодами для компанії, обумовленими зниженням навантаження на фонд оплати праці, за такого підходу виникають проблеми, пов'язані з відсутністю у інженерів достатньої кількості часу, який можна було б приділити енергомоніторингу та підвищенню рівня енергетичної ефективності компанії. Зазвичай, дані з приладів обліку знімаються лише в періоди щомісячної звітності, а їхній аналіз обмежується перевіркою виконання встановлених керівництвом компанії норм енергоспоживання.

Закон України “Про енергетичну ефективність” [1] передбачає, що суб'єкти господарювання із середнім рівнем річного енергоспоживання в обсязі 100 тисяч МВт·год на рік та вище зобов'язані проводити енергетичний аудит кожні чотири роки або впровадити і сертифікувати систему енергетичного та/або екологічного менеджменту з метою забезпечення неухильного підвищення рівня енергетичної ефективності. Враховуючи високий граничний рівень енергоспоживання, вимоги Закону розповсюджуються переважно на потужні промислові підприємства. Водночас, малі та середні підприємства (МСП), в яких найбільш часто спостерігаються проблеми з енергетичним менеджментом і енергомоніторингом через малу чисельність або відсутність служб експлуатації фактично опинилися поза вимогами Закону [1].

МСП відіграють ключову роль в економіці України, забезпечуючи близько 64% доданої вартості, 81,5% зайнятих працівників у суб'єктів господарювання та 37% податкових надходжень [2]. Українським МСП надається як державна [3], так і міжнародна підтримка, зокрема існує низка цільових економічних програм підвищення рівня енергетичної ефективності, метою яких є зменшення викидів парникових газів.

Проте, на відміну від інвестиційних енергоефективних заходів, зазначені програми зазвичай жодним чином не стимулюють підвищення продуктивності систем енергетичного менеджменту (СЕНМ) МСП. Враховуючи значення МСП в економіці України [4], підвищення продуктивності СЕНМ через управління даними енергомоніторингу в умовах скорочення інженерного персоналу і дефіциту в енергосистемі є актуальним завданням, оскільки дозволить відчутно скоротити витрати МСП на оплату енергоресурсів і спрямувати вивільнені кошти на розвиток бізнесу.

Метою досліджень є підвищення продуктивності систем енергетичного менеджменту МСП через управління даними енергомоніторингу і вдосконалення технічного обслуговування технологічного устаткування.

Для досягнення поставленої мети заплановано дослідження методів та засобів систем енергомоніторингу МСП, в ході виконання яких буде виявлено і реалізовано потенціал підвищення продуктивності таких систем, що має підвищити продуктивність СЕНМ в цілому. Заплановані дослідження виконуються в рамках енергетичних аудитів, під час яких, зокрема, зібрано дані енергоспоживання обладнання та інженерних систем, характерних для МСП (далі – об'єкти дослідження), проведено аналіз результатів ТО технологічного устаткування та виконано їхню обробку в рамках розв'язання таких завдань:

- статистичний аналіз з визначенням патернів енерговикористання (сезонність, періодичне підвищення/зниження енергоспоживання тощо);
- оцінка доцільності та необхідної періодичності індивідуального контролю енергоспоживання (енергомоніторингу) для кожного об'єкту дослідження;
- верифікація та валідація даних;
- визначення факторів впливу на режими енергоспоживання об'єктів дослідження та оцінка можливості та економічної доцільності керування енерговикористанням з врахуванням таких факторів;
- визначення впливу регламентних ТО об'єктів дослідження на рівень енергоспоживання МСП та оцінка понаднормових витрат енергії залежно від своєчасності та якості проведення ТО;
- оцінка якості ТО шляхом дослідження рівня енергоспоживання МСП до та після його проведення і диференціація об'єктів дослідження, для яких таку оцінку може бути застосовано;
- розрахунок і обґрунтування цільового енергоспоживання об'єктів дослідження з урахуванням факторів впливу;
- розрахунок і обґрунтування довірчого інтервалу та розробка механізмів формування (вимірювання, фіксування тощо), збирання, аналізу та інтерпретації даних енергоспоживання в автоматичному режимі, а також розробка сценаріїв ухвалення та втілення управлінських рішень за відхилення енергоспоживання за межі очікуваних рівнів.

За результатами досліджень буде сформовано вимоги до вдосконалення методів та засобів енергомоніторингу, зокрема, функцій та інструментарію, і реалізовано:

- формування вимог до системи енергомоніторингу з метою її вдосконалення на МСП і реалізації політики управління ефективністю використання енергії;
- визначення потенціалу діджиталізації під час створення системи енергомоніторингу з метою виключення суб'єктивних факторів з процесів збирання та оброблення даних енергоспоживання;
- інтерпретування результатів енергомоніторингу із залучення технологій big data і штучного інтелекту (ШІ);
- конвертування результатів застосування СЕНМ у прямі і непрямі вигоди для МСП.

Матеріал досліджень. Проблеми енергомоніторингу та ефективного управління енерговикористанням досліджувало багато науковців, зокрема, КПІ ім. Ігоря Сікорського: А.В. Праховник [5, 6], В.П. Розен, О.І. Соловей [7] та ін. На думку авторів саме діджиталізація та вилучення суб'єктивних факторів з процесів енергомоніторингу МСП чинить найбільший вплив на підвищення продуктивності систем енергетичного менеджменту та рівня енергоефективності в цілому. Кінцева мета полягає у повній автоматизації процесів формування, збирання, агрегування, оброблення, аналізування даних енергоспоживання, а також ухвалення та імплементації управлінських рішень на базі сучасних систем енергомоніторингу, які функціонують в цілком автоматичному режимі та інтерпретують дані енергоспоживання для продуктивного розв'язання таких завдань:

- контролю базового рівня енергоспоживання і дотримання встановлених лімітів;
- прогнозування енергоспоживання та управління попитом;
- планування енергоспоживання та економії енергоресурсів;
- відстеження рівня досягнутої/досяжної енергоефективності [8];
- оптимізації режимів роботи обладнання та інженерних систем.

Повна автоматизація процесів енергомоніторингу дозволяє прискорити і підвищити продуктивність процесів прийняття рішень та адаптування до поточної ситуації. Очікується, що це стане одним із рушіїв

цифрової трансформації (діджиталізації) МСП і реалізації концепції Індустрії 4.0, що охоплює шість етапів розвитку від використання окремих комп'ютерних програм до адаптованості до мінливого середовища [9].

Під час енергетичного аудиту науково-виробничого підприємства у м. Києві взимку 2024 року досліджено потенціал використання енергомоніторингу. Визначено, що облік споживання електроенергії підприємства здійснюється 8-ма ввідними комерційними вузлами обліку. Додатково на підприємстві встановлено 135 лічильників технічного (технологічного) обліку електроенергії, які забезпечують облік понад 86% від загального споживання електроенергії підприємством. Технічний облік диференційовано як за групами однотипних струмоприймачів, так і за ввідними розподільними пристроями (ВРП) та головними розподільними щитами (ГРЩ), від яких заживлено різні групи споживачів (вентиляція, освітлення, розеткові групи тощо). Таким чином, підприємство забезпечено деталізованим обліком електроенергії і створено всі передумови для реалізації продуктивного енергомоніторингу.

Під час проведення енергоаудиту встановлено, що дані електроспоживання по всіх комерційних і технічних точках обліку збиралися вже понад рік, проте, жодним чином не аналізувалися фахівцями попри наявність на підприємстві власної служби експлуатації, яка складається з усіх необхідних профільних інженерів. Аналіз статистичних погодинних даних електроспоживання по багатьох точках технічного обліку показав періодичні нетипові відхилення від патернів (рис. 1), як то відсутність зниження споживання в неробочі години та у вихідні дні, відсутність кореляції споживання погодозалежного обладнання з температурою довкілля тощо (рис. 2).

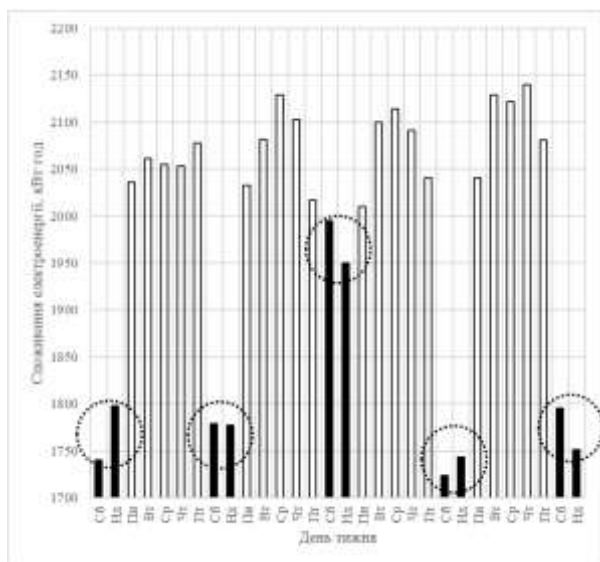


Рисунок 1 – Добове споживання електроенергії обладнання і його ліміт

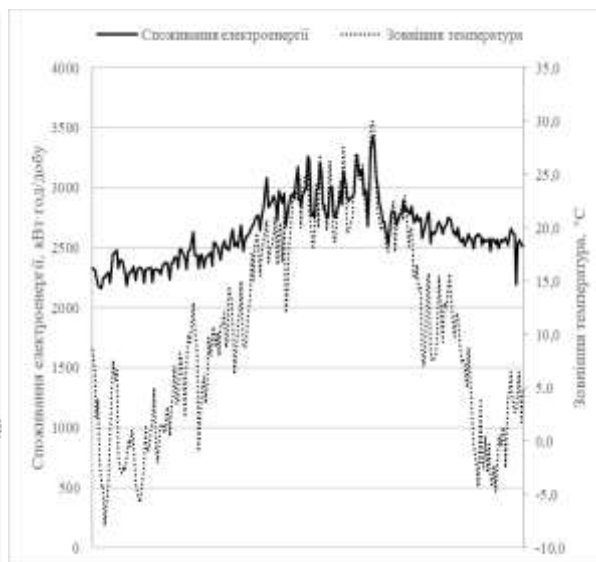


Рисунок 2 – Добове споживання електроенергії погодозалежного обладнання і середньодобова температура зовнішнього повітря

Оскільки пояснення таким відхиленням не надано службою експлуатації, зроблено припущення, що їх спричинено суб'єктивним фактором внаслідок недостатнього рівня трудової дисципліни. Через відсутність належного енергомоніторингу і оперативного визначення причин відхилень електроспоживання річна перевитрати електроенергії на підприємстві склали щонайменше 12%.

Іншим потенціальним джерелом підвищення рівня енергетичної ефективності є технічне обслуговування технологічного устаткування відповідно до технічної документації за встановленими регламентами. ДСТУ 9050:2020 [10] визначено, що ТО – це комплекс операцій чи операція для підтримки справного стану чи працездатності об'єкта, що використовується за призначенням, під час простою, зберігання та транспортування. ТО інженерних систем та технологічного енергоспоживаючого обладнання має виконуватись з періодичністю і відповідно до регламентів, зазначених в технічній документації на це обладнання або у відповідних галузевих стандартах. Виконавцем ТО може виступати як власна служба експлуатації підприємства, так і стороння організація на договірній основі.

Під час енергетичного аудиту офісно-складського комплексу у м. Києві влітку 2019 року виконано вимірювання параметрів роботи компресорних холодильних машин, зокрема, тиску/температури випаровування і конденсації, переохолодження та перегріву, а також споживання електричної енергії. Для охолодження повітря приміщень комплексу в теплий період року використовуються мультизональні системи (VRF/VRV) виробництва "Daikin" потужністю від 30 до 50 кВт, що працюють на холодоагенті R410A. Загалом система кондиціонування складається з 10 зовнішніх і 59 внутрішніх блоків.

Переохолодження і перегрів холодоагенту є ключовими показниками правильного налагодження і коректної роботи холодильних машин. Температура переохолодження ($T_{п.о.}$) визначається як різниця між температурою конденсації холодоагенту ($T_{конд}$) і температурою холодоагенту у рідкому стані на виході з конденсатора (T_x):

$$T_{п.о.} = T_{конд} - T_x. \quad (1)$$

Температура перегріву ($T_{п.г.}$) визначається як різниця між кипіння парорідинної суміші у випарнику ($T_{вип}$) і температурою холодоагенту у пароподібному стані, що всмоктується в компресор ($T_{всм}$).

$$T_{п.г.} = T_{вип} - T_{всм}. \quad (2)$$

За результатами вимірювань по всіх машинах було виявлено, що переохолодження холодоагенту менше 2 К, а перегрів перевищує 10 К, внаслідок чого продуктивність холодильних машин виявилася нижчою на 3-20% від паспортних значень. Оскільки VRV системи виробництва “Daikin” є одними з найкращих на ринку, можливість виробничого браку одразу на всіх машинах не розглядалася. Зазвичай, подібні проблеми спричинені неправильним заправленням холодильного контуру холодоагентом. Варто зазначити, що ТО системи кондиціонування повітря було виконано підрядником навесні 2019 року, за кілька місяців до проведення енергоаудиту. Згідно з переліком робіт в рамках періодичного ТО, зазначеного у акті виконаних робіт, рівень холодоагенту перевірено по всіх системах і виконано дозаправку по тих системах, де це було необхідно. Однак аналіз даних енергоаудиту показав, що роботу лише 2-х з 10-и систем кондиціонування можна було прирівняти до штатної. Це означає, що ТО було виконано з недотриманням регламентів і контроль за його виконанням був неналежним. Внаслідок консервативної оцінки, приведеної до умов стандартного року, було встановлено перевитрату електроенергії на потреби системи кондиціонування повітря 8%.

Приведені приклади ілюструють недосконалість енергомоніторингу і ТО та надають розуміння потенціалу енергозбереження.

Висновки. В умовах скорочення чисельності служб експлуатації автоматизація енергомоніторингу і виключення суб’єктивного фактора може суттєво підвищити продуктивність систем енергетичного менеджменту загалом і дозволить зменшити енергоспоживання МСП, що своєю чергою призведе до підвищення рівня їх енергоефективності, конкурентоспроможності, стійкості та адаптивності перед актуальними викликами, та в цілому буде сприяти післявоєнному відновленню та сталому розвитку українського суспільства.

Список використаної літератури

1. Закон України “Про енергетичну ефективність”. Редакція від 18.09.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення 15.11.2024).
2. Підтримка малого і середнього підприємництва. URL: <https://www.kmu.gov.ua/reformi/ekonomichne-zrostantnya/pidtrimka-malogo-i-serednogo-pidpriyemnictva> (дата звернення 15.11.2024).
3. Закон України “Про розвиток та державну підтримку малого і середнього підприємництва в Україні”. Редакція від 05.10.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4618-17> (дата звернення 15.11.2024).
4. Оцінка впливу війни на мікро-, малі та середні підприємства в Україні. Київ: Програма розвитку ООН в Україні, 2024 рік – 86 с. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-04/undp-ua-smb-2024.pdf> (дата звернення 15.11.2024).
5. Практичний посібник з енергозбереження для об’єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України/А. В Праховник та ін. Луганськ, вид-во “Місячне сяйво”, 2010 – 696 с.
6. Енергетичний менеджмент: навч. посіб. / А.В. Праховник та ін.; під ред. А.В. Праховника; Національний технічний ун-т України “Київський політехнічний ін-т”, Інститут енергозбереження та енергоменеджменту. – К.: Київська нотна ф-ка, 1999. – 184 с.
7. Праховник А.В., Розен В.П., Соловей О.І та ін. Енергетичний менеджмент. – К.: Київська нотна фабрика, 2001 – 472 с.
8. ДСТУ ISO 50006:2016 Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої/досяжної енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення та настанова. [Чинний від 01.09.2016]. ДП «УкрНДНЦ», 2016. (Інформація та документація).
9. Schuh, G./Anderl, R./Dumitrescu, R./Krüger, A./ten Hompel, M. (Eds.): Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020 – (acatech STUDY), Munich 2020 URL: <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/> (дата звернення 15.11.2024).
10. ДСТУ 9050:2020 Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять. [Чинний від 01.04.2021]. ДП «УкрНДНЦ», 2021. (Інформація та документація).

O. Kotsar¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7958-2335

S. Dovgyi¹, PhD student, ORCID 0009-0003-9428-7240

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ENHANCEMENT THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS PERFORMANCE IN THE SME VIA ENERGY MONITORING DATA GOVERNANCE

More than 200 energy audits of power and industrial enterprises, commercial companies and households revealed a number of weaknesses, including insufficient use of the energy monitoring potential ; poor quality of energy monitoring data, in particular in terms of its completeness, reliability and relevance; lack of proper analysis of energy using data; improper formalisation, unification and automation of energy monitoring processes; disregard for the benefits of regular maintenance of energy-consuming equipment and lack of quality control of such maintenance. These problems do not allow to fully utilise the energy management systems potential and lead to an insufficient level of energy efficiency. In order to overcome these gaps, the article analyses the ways of utilising the energy monitoring potential and improving the maintenance of technological equipment in the small and medium-sized enterprises in order to develop requirements for energy monitoring systems and implement energy efficiency policies, the energy monitoring digitalisation potential was assessed, the interpretation of energy monitoring results using modern information technologies was applied, and consider direct and indirect benefits from the improved of energy management system performance. References 10. Fig. 2.

Keywords: electricity, energy efficiency, energy management, energy audit, energy monitoring, SMEs, service maintenance.

References

1. The Law of Ukraine “On Energy Efficiency”. Version of 18.09.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (accessed at 15.11.2024). (Ukr)
2. Support for small and medium-sized enterprises. URL: <https://www.kmu.gov.ua/reformi/ekonomichne-zrostannya/pidtrimka-malogo-i-serednogo-pidpriyemnictva> (accessed at 15.11.2024). (Ukr).
3. The Law of Ukraine “On the Development and State Support of Small and Medium-Sized Enterprises in Ukraine”. Version of 05.10.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4618-17> (accessed at 15.11.2024). (Ukr).
4. Assessment of the impact of the war on micro, small and medium-sized enterprises in Ukraine. Kyiv: United Nations Development Programme in Ukraine, 2024 - 86 p. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-04/undp-ua-smb-2024.pdf> (accessed at 15.11.2024). (Ukr).
5. Practical guide to energy saving for industrial, construction and housing and communal facilities of Ukraine / A. Prakhovnyk et al. Luhansk: Misiachne Siayvo, 2010. 696 p. (Ukr).
6. Energy management: a textbook / A.V. Prakhovnyk et al; ed. by A.V. Prakhovnyk; National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Institute of Energy Saving and Energy Management. – Kyiv: Kyivska Notna Fabryka, 1999. – 184 p. (Ukr).
7. A.V. Prakhovnyk, V.P. Rosen, O.I. Solovey et al. Energy Management – Kyiv: Kyivska Notna Fabryka, 2001 - 472 p. (Ukr).
8. DSTU ISO 50006:2016 Energy management systems. Measuring energy performance using energy baselines and energy performance indicators. General principles and guidance. [Effective as of 01.09.2016]. UkrNDNC, 2016. (Ukr).
9. Schuh, G./Anderl, R./Dumitrescu, R./Krüger, A./ten Hompel, M. (Eds.): Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020 – (acatech STUDY), Munich 2020 URL: <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/> (accessed at 15.11.2024).
10. DSTU 9050:2020 Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions. [Effective as of 01.04.2021]. UkrNDNC, 2021. (Ukr).

Надійшла: 11.12.2024

Received: 11.12.2024

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ КОГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТА РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Дослідження спрямоване на оцінку ефективності виробництва теплової та електричної енергії на основі різних технологій, таких як котельні, когенераційні установки та міні-ТЕЦ (ОРС-цикл). Особлива увага приділяється порівнянню з існуючими автономними та індивідуальними системами енергозабезпечення. Для оцінки використовуються методологічні підходи, які враховують економічну доцільність та технічну ефективність кожної технології. Стаття аналізує впровадження когенерації та Power-to-Heat технологій для оптимізації роботи централізованих систем теплопостачання, що підвищить загальну ефективність та зменшить викиди вуглецю. Запропоновано шляхи пошуку інвестицій, враховано вплив на ефективність теплових та електричних мереж, зниження викидів вуглецю та оптимізацію витрат.

Ключові слова: когенерація, ОРС-цикл, Power-to-Heat, централізоване теплопостачання, енергоефективність, тепломережі, модернізація енергосистем.

Вступ

Останніми роками модернізація енергетичних систем та впровадження відновлюваних джерел енергії стали критично важливими для багатьох країн, зокрема України, Європейського Союзу та Китаю. В Україні ця проблема особливо актуальна через застарілі технології, нестабільні поставки палива та необхідність забезпечення енергонезалежності. Попит на тепло та електроенергію зростає, а стабільність енергосистеми під загрозою через нестабільну генерацію з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та військові дії.

Для стабілізації енергосистеми необхідно побудувати щонайменше 1 ГВт високоманеврових потужностей зі швидким стартом, які можуть активуватися протягом 15 хвилин і здійснювати пуск та зупинку не менше чотирьох разів на добу з діапазоном регулювання не менше 80% від встановленої потужності. Для максимального використання ВДЕ потрібно збільшити обсяги високоманеврових потужностей до 2 ГВт. Також необхідно впровадити щонайменше 0,5 ГВт систем акумуляування електроенергії, які дозволять залучити ВДЕ до балансування енергосистеми та забезпечення резервів. У разі обмеження потужностей атомних електростанцій (АЕС), потреба в системах накопичення енергії може зрости до 2 ГВт. Особливо критичною ситуація є в Україні, зокрема в містах-супутниках теплових електростанцій, таких як Українка, Ладижин, Бурштин, де електро- і теплопостачання під загрозою зими 2024-2025 рр. Через можливі перебої в роботі місцевих електростанцій, викликані інфраструктурними проблемами та військовими діями, міста можуть залишитися без опалення. Це створює додаткову потребу у впровадженні ефективних та надійних систем теплопостачання.

Сучасна українська енергосистема має значні проблеми зі старою інфраструктурою котельень та тепломереж, що ускладнює підтримання стабільного теплопостачання в багатьох регіонах країни. Це потребує впровадження нових підходів для забезпечення енергетичної стійкості та ефективності. Особливо важливим є дослідження можливості впровадження когенерації та міні-ТЕЦ на базі ОРС-циклів (органічний цикл Ренкіна (міні-ТЕЦ (ОРС), які можуть бути оптимальними для виробництва тепла і електроенергії в невеликих містах або регіонах з обмеженими енергетичними ресурсами.

Мета дослідження є оцінювання ефективності виробництва теплової та електричної енергії на базі існуючих котельень, ТЕЦ та когенераційних установок. Для визначення переліку ефективних рішень в частині енергоефективності, економічності та надійності забезпечення стабільного теплопостачання в умовах, коли існуюча тепла електрична станція або не є доступною, або її застосування є неможливим через технічні або економічні причини.

Постановка завдання

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз сучасних технологій теплофікації, включаючи їх ефективність та надійність;
- здійснити порівняння вартості теплопостачання від різних джерел, таких як існуючі ТЕЦ, індивідуальні системи опалення, а також когенераційні установки і міні-ТЕЦ;
- визначити можливі шляхи фінансування модернізації теплопостачальних систем, включаючи державні та приватні інвестиції, гранти, кредити та інші фінансові механізми.

Методологія дослідження передбачає проведення аналіз існуючої інфраструктури теплогенерації, включаючи оцінку технологій, стану ТЕЦ, котельень та автономних систем енергозабезпечення. Оцінюються альтернативні технології, такі як когенераційні установки та системи «Power-to-Heat», з метою вибору рішень для модернізації. На основі цього розробляється методологія оцінки ефективності, що передбачає економічний аналіз інвестицій, визначення критеріїв ефективності та розрахунок окупності. Потім здійснюється порівняльний аналіз різних систем, зокрема когенераційних, автономних, ТЕЦ та індивідуальних систем, а також їх впливу на ринок електроенергії. На основі отриманих даних формулюються рекомендації щодо оптимізації витрат, зменшення викидів CO₂ та інтеграції з існуючою тепловою мережею. Завершується дослідження висновками та пропозиціями для майбутніх інвестицій. Блок-схема методології дослідження представлення на рис. 1.

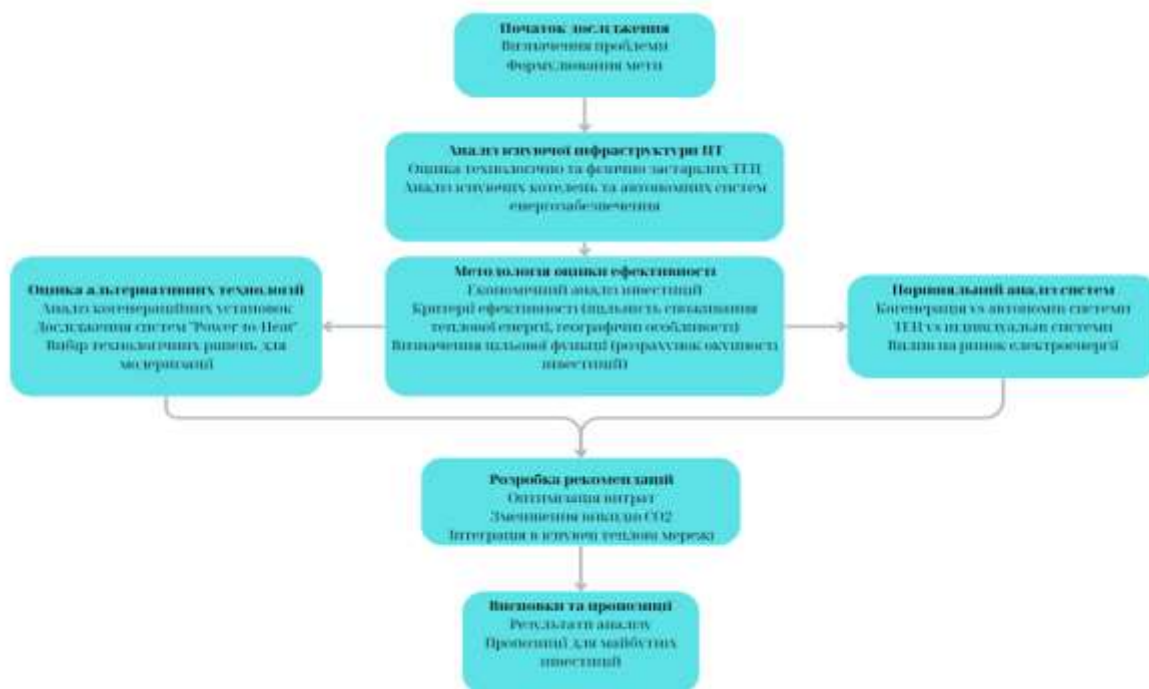


Рисунок 1 – Блок-схема методології дослідження

1. Огляд літератури

Системи теплопостачання в Німеччині та Китаї демонструють різні підходи до підвищення ефективності централізованих теплових мереж. Наприклад, у Дрездені з 1997 року мережа функціонує без вугілля, але значною мірою залежить від природного газу, що свідчить про потенціал збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у секторі опалення міста, що є важливим для України [1, 2, 3].

Електрифікація сектора опалення, зокрема через технології «Power-to-Heat», визнана ефективною стратегією декарбонізації, здатною зменшити викиди в енергетичному секторі до 17% за умов розвитку низьковуглецевої генерації [4]. Крім того, електрифікація опалення дозволяє знизити залежність від викопного палива у зимовий період завдяки розподіленій генерації та когенерації [5-7]. Розподілені газогенераційні технології є перспективним напрямом для підвищення енергетичної безпеки України, особливо в умовах кризових ситуацій. Зазначено, що вони здатні стабілізувати енергопостачання у малих містах та селищах, забезпечуючи надійність та стійкість системи [8].

У європейському контексті в 2017 році 69% теплової енергії було вироблено на ТЕЦ і 31% — на котельнях, що свідчить про високу ефективність когенерації [9-11]. У 2022 році 25% тепла в ЄС було отримано з відновлюваних джерел, а 75% — з інших видів палива, що ілюструє суттєве зростання частки ВДЕ та вказує на можливості для подальшого розвитку. На рис. 2 представлено частку ВДЕ у виробництві тепла в ЄС та Україні у 2022 році.

У Швеції, Естонії, Латвії, Фінляндії та Данії спостерігаються найвищі показники використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) — від 53% до 69%, що свідчить про ефективні національні політики та значні інвестиції в цей сектор. Натомість у таких країнах, як Франція (27%), Німеччина (18%), Бельгія (10%) та Ірландія (6%), показники використання ВДЕ є значно нижчими, що підкреслює необхідність посилення зусиль для їх збільшення. В Україні лише 7% тепла виробляється з ВДЕ, що є одним із найнижчих показників у Європі, тоді як 60% тепла генерується на котельнях і лише 40% — на ТЕЦ. Це вказує на необхідність розвитку когенерації та впровадження ВДЕ для підвищення енергоефективності.

зменшення викидів парникових газів, досягнення енергетичної незалежності та сталого розвитку енергетичного сектору. Дослідники наголошують на важливості впровадження розподілених систем генерації для стабілізації енергопостачання, що стає актуальним на тлі нестабільності енергетичного ринку [12]. Ефективність когенераційних систем (СНР) підтверджує потенціал для одночасного виробництва тепла та електроенергії, що дозволяє підвищити паливну ефективність у великих теплових мережах [13].

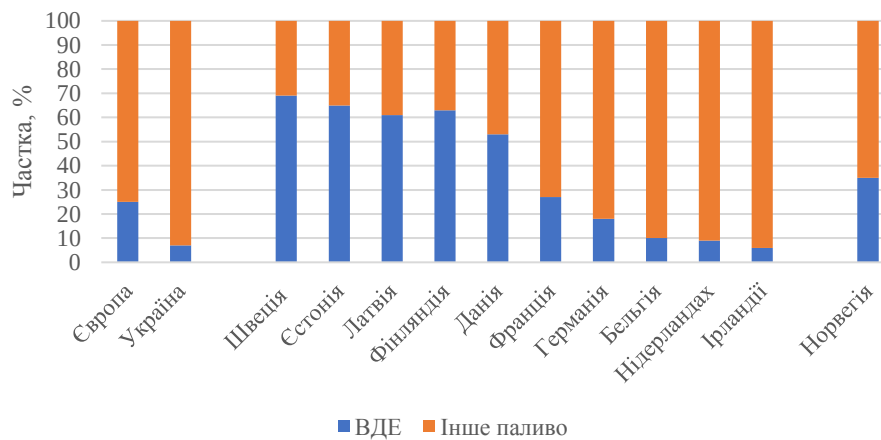


Рисунок 2 – Частка ВДЕ у виробництві тепла в ЄС та Україні у 2022 році

Біомасові когенераційні установки та міні-ТЕЦ на основі ОРС-циклу також мають значний потенціал для балансування енергосистеми України, зокрема в містах, таких як Кам'янець-Подільський, Чернівці та Житомир. Використання біомаси сприяє зменшенню залежності від викопного палива та покращенню екологічних показників [14].

Необхідність модернізації ТЕЦ шляхом впровадження сучасних технологій обробки палива та використання СНР є важливим кроком для підвищення ефективності та зменшення залежності від викопного палива. Дослідники акцентують увагу на значенні електрифікації теплопостачання для досягнення енергетичної незалежності, а також на економічній доцільності використання ВДЕ у цьому секторі [15-19]. В Україні обговорюється перехід до енергоефективних систем централізованого теплопостачання (ДН-систем) четвертого покоління (4G-DH), що включають генерацію на базі ВДЕ, когенерацію, смарт-облік та диспетчеризацію. Ці системи є перспективними завдяки використанню сонячної та вітрової енергії, міні-ТЕЦ на біопаливі, що сприяє підвищенню надійності та зменшенню теплових втрат, а також покращує гнучкість міської енергетичної інфраструктури [20-28].

Прикладом активного впровадження енергоефективних рішень є місто Житомир, де на кошти місцевого бюджету, фондів та урядових програм створено низку генераційних об'єктів, спрямованих на досягнення енергетичної незалежності. Серед них — мікро-ГЕС потужністю 0,19 МВт, мікро-ТЕЦ на базі ОРС-циклу потужністю 1,2 МВт (електричною) та 6 МВт (тепловою), сонячна електростанція потужністю 50 МВт, когенераційні установки на біогазі та природному газі, а також котельні на біопаливі та RDF [27-30]. Подібні ініціативи активно підтримуються і в інших містах, таких як Вінниця та Черкаси, де розвиток енергоменеджменту, залучення державних і міжнародних програм сприяють розвитку енергетики [5, 31].

На рис. 3 представлено сучасний підхід до модернізації систем централізованого теплопостачання (ЦТ) в Україні з акцентом на впровадження когенераційних технологій.

Огляд показує, що інтеграція когенераційних технологій, міні-ТЕЦ (ОРС), ВДЕ, енергоменеджменту та систем "Power-to-Heat" здатна не лише знизити викиди, а й підвищити стабільність тепло- та електропостачання України, що є критично важливим для відбудови та сталого розвитку галузі. Модернізація теплопостачання сприяє ефективнішому використанню теплової енергії та швидкій окупності інвестицій, оскільки, як зазначає [32], висока щільність теплового споживання прискорює повернення інвестицій, що підвищує конкурентність ДН-систем на тлі зростання цін на енергоносії.

Тим часом більшість досліджень фокусується на традиційних системах, тоді як сучасні енергомережі потребують подальшого дослідження.

2. Матеріал і результати досліджень економічної ефективності різних видів теплопостачання для опалення включає оцінку споживання теплової енергії, собівартості виробництва та впливу на довкілля. Методологія враховує вплив технологій на енергоефективність ДН та аналізує можливості модернізації для інтеграції інновацій, зокрема СНР, із акцентом на зниження викидів та економічну доцільність.

Розрахунки для визначення вартості 1 Гкал теплоти, оцінка економічності різних джерел енергії, зокрема кількість палива, електроенергії для виробництва теплової енергії розглянуто в [33-35].

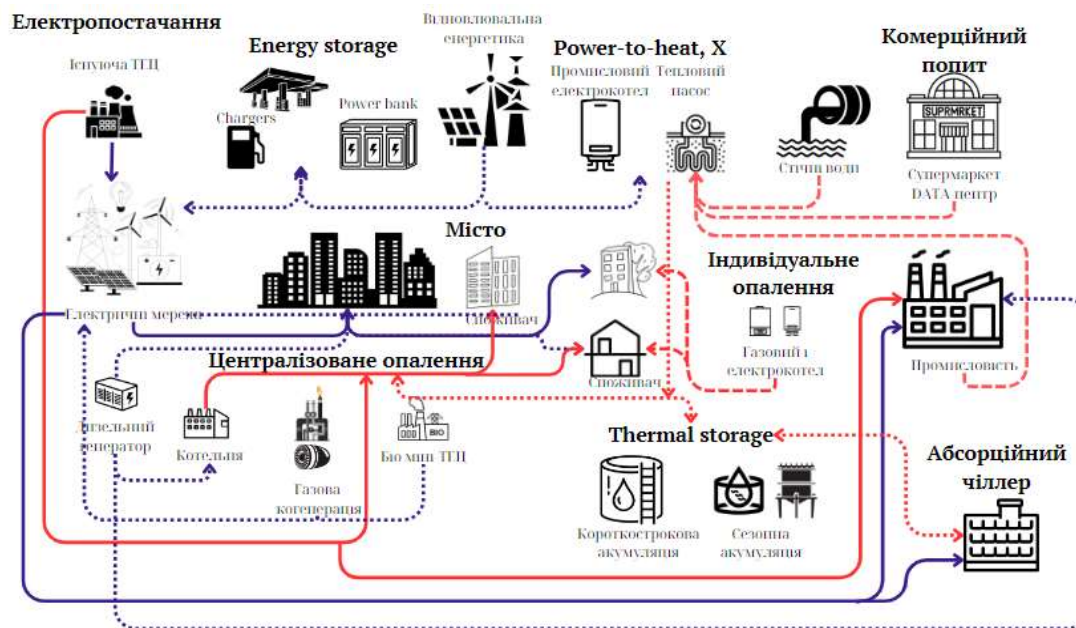


Рисунок 3 – Опис районної тепло- та електроенергетики

Методика та приклади розрахунку, що описані в [33] та при розрахунку парціанальних витрат палива виробництві теплової енергії на ТЕЦ або когенерації можна використовувати [26] на основі її виконаємо розрахунки нижче. Наведені залежності дають можливість зрозуміти прямі витрати на вироблення теплової енергії з різних технологій [33-39].

Для оцінювання доцільності різних систем ДН з урахуванням сучасних викликів, наслідків війни та процесів відновлення, слід брати до уваги експлуатаційні витрати, енергетичні, екологічні та економічні вимоги, безпеку, обслуговування, а також інтереси споживачів, постачальників і держави. Основними вимогами для міст є:

- Скорочення енергоспоживання без втрати комфорту;
- Зменшення впливу на довкілля та викидів парникових газів;
- Оптимізація економічних витрат;
- Забезпечення безпеки теплопостачання;
- Якісне обслуговування теплових і електричних систем.

Цей підхід поєднує екологічні, економічні та соціальні аспекти в розвитку ДН. Модернізація ЦТ із впровадженням газових і біогазових СНР, міні-ТЕЦ (ОРС) на деревній щепі дозволяє ефективно поєднувати виробництво теплової та електричної енергії, що є актуальним для регіонів із високим попитом на енергоносії, як у Бурштині. В останні десятиліття місцеві влади багатьох українських міст, таких як Івано-Франківськ, рекомендують перехід на індивідуальне опалення. Аналогічний процес триває у місті Бурштин, яке поступово переходить на локальні системи, навіть маючи поблизу ТЕЦ.

Аналіз теплопостачання м. Бурштин та пропозиції щодо децентралізації

На даний момент до ДН м. Бурштин підключено 81 багатоквартирний будинок і 358 приватних домоволодінь. Після руйнування Бурштинської ТЕС міськрадою була створена робоча група з питань децентралізації теплопостачання та диверсифікації джерел теплової енергії. Як альтернативні рішення для опалення міста розглядаються [27, 30, 31, 39, 40]: будівництво загальноміської котельні; будівництво кількох квартальних котельнь; встановлення дахових котельнь; впровадження індивідуального опалення.

Житловий фонд міста Бурштин складається на 60% з багатоквартирних будинків та на 40% з приватного сектору. Основна частина багатоквартирного житла — це панельні будинки 1960-х років, 83% яких мають водопровід, каналізацію, центральне опалення та гаряче водопостачання. Інфраструктура містить 103 багатоквартирні будинки загальною площею 207,606 м², 39,2 км водопровідних мереж, 36,9 км каналізаційних мереж, 29,66 км теплових мереж та 57 км мереж зовнішнього освітлення. Зношеність теплових мереж становить 43,2%, що призводить до 18% втрат теплової енергії.

Основним джерелом тепла для міста є ДТЕК Бурштинська ТЕС з встановленою тепловою потужністю 177,8 Гкал/год, з яких 160 Гкал/год виробляється в гарячій воді та 17,8 Гкал/год у парі. Тепло для гарячої води генерується на 11 енергоблоках та двох пікових бойлерах, при цьому частково відпрацьована пара використовується для виробництва пари.

Теплопостачання м. Бурштин забезпечується ДТЕК Бурштинська ТЕС. Наявна потужність становить 131,8 Гкал/год через старіння обладнання та особливості роботи в режимі «Острова». Система — відкритого типу, робота мережі безперервна, з температурним графіком 115-70 °С.

Критерії щодо теплопостачання: зниження енергоспоживання та зношення обладнання; централізоване регулювання відпуску тепла; безперервність обслуговування системи.

Теплова енергія транспортується через теплопроводи за допомогою насосів, серед яких три ЦН1000-180 та один ЦН400. Підживлення системи виконується деаерованою хімічно очищеною водою. Система є відкритого типу і працює безперервно протягом року, при цьому температура гарячої води варіюється за температурним графіком 115-70°С.

Індивідуальне опалення

Виділення 15 кВт електроенергії на квартиру в багатоквартирному будинку задовольняє розумні потреби в споживанні електрики, включаючи опалення та гаряче водопостачання, і є достатнім для квартир до 100 м², розрахованих на чотирьох осіб. Однак для живлення такого обладнання часто потрібна реконструкція розподільчих мереж будинку, району та міста, включаючи заміну дорогих високовольтних комірок і трансформаторів [41-43]. Газові котли аналогічної потужності також потребують реконструкції системи газопостачання будинків і наявності достатнього запасу газу. Вони залежать від електроживлення, і без джерел безперебійного живлення не працюватимуть під час відключення електрики [41].

У статті досліджено основні аспекти розрахунків витрат палива та електроенергії для виробництва теплової енергії на ТЕЦ і електричних котлах у м. Бурштин. Проведено порівняльний аналіз економічної ефективності цих підходів. Розрахунки виконані за допомогою програмного комплексу MATLAB, результати представлені в таблиці 1.

Вихідні данні для розрахунків:

1. Потужність ТЕЦ: $Q_{\{tpp\}} = 114$ Гкал/год = 132 582 кВт.
2. Розрахунок витрат палива для вироблення теплової енергії з побутових газових котлів:
 - ККД котла $\eta_{\text{т}}^{\text{Джк}} = 90\%$;
 - Теплотворна здатність природного газу $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 37\,910$ кДж/м³;
 Загальні витрати коштів на теплову енергію з NG (4):
 - Ціна природного газу: $C_{\text{NG}} = 16$ грн/м³;
3. Розрахунок витрат електроенергії для побутових електричних котлів:
 - ККД електрокотла: $\eta_{\text{т}}^{\text{e,arp}} = 95\%$;
 - Вартість електроенергії $C_{\text{EE}} = 4,5$ грн/кВт*год (в розрахунках нехтуємо субсидіюванням, що з 1 жовтня для населення з електроопаленням діятиме ціна на електроенергію 2,64 грн/кВт*год при споживанні до 2000 кВт*год в місяць);
4. Розрахунок витрат палива для вироблення теплової енергії з когенерації на базі FG Wilson [37]:
 - Теплова потужність – 1 250 кВт; Витрата газу на 1 кВт – 0,32 м³/кВт.
 Загальні витрати коштів на теплову енергію з NG (4):
 - Ціна природного газу: $C_{\text{NG}} = 16$ грн/м³;
5. Для існуючої ТЕЦ* (тариф на теплову енергію для м. Бурштин) [44]: $C_{\text{TRP}}^{\text{Gk}} = 700,42$ грн/Гкал;

Таблиця 1 – Результати розрахунків витрат палива та електроенергії для виробництва теплової енергії з різних джерел теплопостачання для м. Бурштин.

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання
Витрата газу на виробництво тепла індивідуальним опаленням	14 280	м ³ /год
Загальна вартість теплової енергії з ПГ	228 485	грн.
Витрата електроенергії на виробництво тепла індивідуальним опаленням	139 894	кВт
Загальна вартість теплової енергії з електроенергії	629 523	грн.
Витрата газу на виробництво тепла з когенерації	5 180	м ³ /год
Загальна вартість теплової енергії з когенерації	82 864	грн.

Тобто аналіз проведених розрахунків, що зведено в рис. 4, опалення на основі побутових електричних котлів є найдорожчий варіант зважаючи на зростання вартості електричної енергії з 1 червня 2024 р., газових котлів дорожче за когенерацію у 2,7 рази та за Бурштинську ТЕЦ відповідно до затвердженого тарифу 2,86 рази. Ці розрахунки демонструють вартісні аспекти виробництва теплової енергії за допомогою різних джерел та обладнання, що дозволяє оцінити ефективність інвестицій та вибрати оптимальне рішення для забезпечення тепла.

У результаті дослідження підтверджено, що інтеграція когенераційних технологій в ДН суттєво підвищує ефективність, зменшує викиди та поліпшує стабільність енергопостачання в Україні.



Результати та їх обговорення

Системи теплопостачання четвертого покоління (4G-DH) мають переваги перед традиційними завдяки інтеграції ВДЕ та когенерації, що підвищує ефективність на 20–30% та скорочує викиди. Використання низькотемпературного теплопостачання знижує залежність від викопних палив. Впровадження когенерації та міні-ТЕЦ (ОРС) є економічно доцільним через нижчу собівартість і можливість одночасного виробництва тепла та електроенергії, що особливо актуально для громад України. Розвиток технологій "Power-to-Heat" та інтелектуальних систем обліку сприяє стабільності інфраструктури, використовуючи надлишки електроенергії для опалення [21, 45–48].

Постанова № 1320 від грудня 2023 р. спростила введення когенераційних і розподілених генерацій в експлуатацію, а зміни до ліцензійних умов у квітні 2023 р. зняли потребу в ліцензії для мобільної когенерації. Важливими залишаються впровадження газових та біогазових СНР і міні-ТЕЦ, що дозволяють ефективно виробляти тепло і електроенергію.

В Україні собівартість опалення електричними котлами залишається високою, особливо з огляду на зростання цін на електроенергію. Газові котли є вдвічі дорожчими від когенераційних установок, що досягають понад 10% економії первинної енергії для великих СНР (>1 МВт) і 0% для малих СНР. Важливо модернізувати тепломережі для зниження втрат, що наразі перевищують нормативні 12%; у Бурштині знос тепломереж оцінюється на рівні 43,2%, що призводить до втрат у 18% [45–47].

Висновки:

Дослідження підкреслює критичну необхідність модернізації теплопостачальних систем в Україні, враховуючи застарілі технології, високу залежність від викопного палива та нестабільність енергопостачання в умовах військових дій. Для досягнення енергетичної незалежності та стабільності пропонується впровадження високоманеврових потужностей, накопичувальних систем і технологій на основі ВДЕ, таких як когенерація та міні-ТЕЦ, особливо в регіонах з обмеженими енергоресурсами.

Аналіз ефективності централізованих і децентралізованих систем опалення, включаючи технології "Power-to-Heat", показав, що розподілені системи генерації, електрифікація теплопостачання та впровадження ВДЕ здатні суттєво знизити викиди парникових газів і підвищити надійність енергетичної інфраструктури. Приклади європейських країн свідчать про значний потенціал впровадження цих технологій в Україні.

Таким чином, інтеграція когенераційних технологій, міні-ТЕЦ, ВДЕ та систем енергоменеджменту здатна не лише поліпшити екологічні показники, а й забезпечити енергоефективність та стабільність тепло- й електропостачання. Це особливо важливо для енергетичної безпеки країни, підвищення конкурентоспроможності та залучення інвестицій для відбудови й сталого розвитку галузі.

Фінансування роботи. що виконується в межах наукових робіт «Удосконалення системи математичних моделей трансформації вугільної промисловості в умовах низьковуглецевого розвитку економіки країни» та «Прогнозування обсягів вуглезабезпечення України відповідно до структури її загального енергетичного балансу», що виконуються в Інституті загальної енергетики НАН України

Подяка.

Доктору технічних наук, проф., засл. енергетику України Кесова Л.О. за вкладені знання та досвід.

Список використаної літератури

1. Sun H., Hirsch H., Xie X. Smart heating and cooling systems for carbon-neutral cities: Policies and practices in Germany and China // *Journal of Infrastructure Policy and Development*. 2024. Т. 8, №9. С. 6842. DOI: 10.24294/jipd.v8i9.6842.
2. Jin J., Wang Y., Zheng X. District heating versus self-heating: Estimation of energy efficiency gap using regression discontinuity design // *China Economic Quarterly International*. 2021. Т. 1, №3. С. 208–220. DOI: 10.1016/j.ceqi.2021.08.003.
3. Teuffer M. Dresden's district heating grid has managed without coal since 1997. Available online: <https://www.energamessenger.com/news/232081/-dresden-s-district-heating-grid-has-managed-without-coal-since-1997-> (дата звернення: 17.06.2023).
4. Thomaßen G., Kavvadias K., Jiménez Navarro J. P. The decarbonisation of the EU heating sector through electrification: A parametric analysis // *Energy Policy*. 2021. Т. 148. С. 111929. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111929.

5. Ковалко О. М., Ковалко Н. М., Євтухова Т. О., Новосельцев О. В. Комунальна теплоенергетика: енергоефективність, структура управління, енергосервісні послуги. Київ : НАН України, Ін-т заг. Енергетики, 2023. URL: <https://web.nlu.org.ua/object.html?id=2196>.
6. Schindler M., Gnam L., Puchegger M., Medwenitsch K., Jasek P. Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites // *Energies*. 2023. Т. 16, №2120. С. 1–15. DOI: 10.3390/en16052120.
7. Chen Y., Zhu Z., Wu J., Yang S., Zhang B. A novel LNG/O₂ combustion gas and steam mixture cycle with energy storage and CO₂ capture // *Energy*. 2017. Т. 126. С. 231–240. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.127.
8. DiXi Group ALERT. Development of Distributed Gas Generation in Ukraine: Strategy and Tactics. 2023.
9. БІЛА КНИГА ЩОДО ТРАНСФОРМАЦІЇ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УКРАЇНІ: ОЦІНКА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРОЄКТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ (ESP) Серпень, 2020 https://energysecurityua.org/wp-content/uploads/2021/04/050G-DH_White-Paper_for_DEC-2021-02-02-UKR.pdf.
10. Renewable energy for heating & cooling up to 25% in 2022 <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240227-2>.
11. Відпуск теплової енергії у розрізі генерації <https://map.ua-energy.org/uk/resources/312022cb-2edb-4f37-b326-6d5eff089353/>.
12. Dombrovskiy O., Heletukha H., Kramar V. How to Launch Distributed Generation in Ukraine // *Economic Truth*. 2024.
13. Chepurnyi M.M., Tkachenko S.Y., Pishenina N.V. Performance Indicators of Energy Installations for Combined Production of Heat and Electricity // *Scientific Papers of VNTU*. 2011. №1.
14. Heletukha H.H. Use of Biomass CHP for Balancing the Energy System of Ukraine // *Thermophysics and Thermal Engineering*. 2020. Т. 42, №3. С. 47–55.
15. Дунаєвська Н. І. Проблеми й технології термічної переробки палив в енергетичних установках теплових електростанцій: За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 22 лютого 2023 року // *Visnik Nacional Noi Akademii Nauk Ukraini*. 2023. №4. С. 72–84. DOI: 10.15407/visn2023.04.072.
16. Basok B., Dubovsky S., Kudelya P. Current Problems of CHP Operation in Ukraine // *Technical Electrodynamics*. 2022. №6. С. 52.
17. Babak V., Kulyk M. Increasing the efficiency and security of Integrated Power System operation through heat supply electrification in Ukraine // *Science and Innovation*. 2023. Т. 19, №5. С. 100–116. DOI: 10.15407/scine19.05.100.
18. Heidariannoghondar M., Ahmadi A. Modeling thermal energy distribution and transmission networks for household consumption through comparative analysis // *Science Progress*. 2023. Т. 106, №4. С. 368504231215583. DOI: 10.1177/00368504231215583.
19. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and Energy-Economic Indicators of Heat Energy Production Through Direct Use of Electricity from Renewable Sources in Modern Heat Generators // In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*. Cham: Springer, 2023. Т. 454. С. 27. DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5_27.
20. Karpenko D., Yevtukhova T. O. MARKET FEATURES OF HEAT PRODUCERS CONTRIBUTION TO LOSSES IN DISTRICT HEATING SYSTEM NETWORKS // *General Energy Institute of NAS of Ukraine*. 2024. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.3.1/37.
21. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Fialko, N., Tymchenko, M., & Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Features of the fourth generation of district heating systems // *International Scientific Journal Internauka*. 2023. (4(138)). DOI:10.25313/2520-2057-2023-4-8633.
22. Карп І. М., Нікітін Є. Є., Півних К. Є. та ін. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні. В 2-х книгах. Книга 1. К.: Наукова думка, 2021. 264 с.
23. Connolly, D. Heat Roadmap Europe: quantitative comparison between the electricity, heating, and cooling sectors for different European countries // *Energy*. 2017. №139. С. 580–593. DOI:10.1016/j.energy.2017.07.037.
24. Böttger, D., Götz, M., Theofilidi, M., & Bruckner, T. Control power provision with power-to-heat plants in systems with high shares of renewable energy sources – An illustrative analysis for Germany based on the use of electric boilers in district heating grids // *Energy*. 2015. №82. С. 157–167. DOI:10.1016/j.energy.2015.01.022.
25. Thorsen J. E., Lund H., Mathiesen B. V. Progression of District Heating — 1st to 4th generation. URL: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/280710833/1_4GDH_progression_revised_May2018.pdf
26. Novoseltsev O.V. Thermal Engineering: Monograph. Kyiv: Institute of Thermal Engineering, 2023. 432 p. ISBN 978-966-02-8159-2. Новини Бурштинської міської ради. URL: <https://burshtyn-rada.gov.ua/novyny/88238/>
27. Сайт компанії Енерго. URL: <https://www.energo.ua/ua/assets>
28. Енергетична карта України. URL: <https://map.ua-energy.org>
29. Persson, U., & Werner, S. Heat distribution and the future competitiveness of district heating // *Applied Energy*. 2011. №88(3). С. 568–576. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.09.020.
30. Філоненко В.М. Когенерація // УДК 621.1/.3. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8461ff89-1307-4582-ab6b-a07b2e5ac58c/content>
31. USAID Проєкт енергетичної безпеки (ПЕБ) у співпраці з Мінрегіоном. Керівництво з розробки схем теплопостачання. URL: <https://energysecurityua.org/ua/zvity>
32. Маляренко В. А., Шубенко О. Л., Андрєєв С. Ю., Бабак М. Ю., Сенєцький О. В. Когенераційні технології в малій енергетиці: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 454 с. ISBN 978-966-695-448-3. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019489.pdf>
33. Басок Б.И., Коломейко Д.А. Анализ когенерационных установок. Анализ энергетической эффективности // *Промышленная теплотехника*. 2006. №4. С. 79–83. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/61431/11-Basok.pdf?sequence=1>

34. Liu, M., Ma, G., Wang, S., Wang, Y., & Yan, J. Thermo-economic comparison of heat-power decoupling technologies for combined heat and power plants when participating in a power-balancing service in an energy hub // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. №152(111715). DOI:10.1016/j.rser.2021.111715.
35. Revesz, A., Jones, P., Dunham, C., Riddle, A., Gatensby, N., & Maidment, G. Ambient loop district heating and cooling networks with integrated mobility, power and interseasonal storage // *Building Services Engineering Research & Technology*: BSER & T. 2022. №43(3). C. 333–345. DOI:10.1177/01436244221085921.
36. Song, W. H., Wang, Y., Gillich, A., Ford, A., Hewitt, M. Modelling development and analysis on the Balanced Energy Networks (BEN) in London // *Applied Energy*. 2019. №233–234. C. 114–125. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.10.054.
37. The Electric House of the Future Was Built in 1905. URL: <https://www.treehugger.com/electric-house-future-was-built-4852759>
38. Pieper, C. Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018: PhD Dissertation. Technische Universität Dresden, 2018.
39. Pieper C. Transformation of the German energy system – Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018. PhD Dissertation. Technische Universität Dresden, 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/339072445_Transformation_of_the_German_energy_system_-_Towards_photovoltaic_and_wind_power_Technology_Readiness_Levels_2018
40. Сайт Бурштинської міської ради. URL: <https://burshtyn-rada.gov.ua/bez-rubryky/taryfy-na-zhytlovo-komunalni-poslugy/>
41. Decarb City Pipes 2050. H/C plan Munich. URL: <https://decarbcitypipes2050.eu/wpcontent/uploads/2022/09/D3.3-HC-plan-Munich.pdf> (дата звернення: 10.08.2023).
42. Potential for Efficient Heating and Cooling for Germany. URL: <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-05/DE%20CA%202020%20en.pdf> (дата звернення: 04.04.2023).
43. Wirtz, M., Schreiber, T., & Müller, D. Survey of 53 Fifth-Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Networks in Germany // *Energy Technology*. 2022. №10(11). DOI:10.1002/ente.202200749.
44. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/news/nkrekp-sproshchuye-umovi-dlya-roboti-kogeneracijnih-ustanovok-yaki-vikoristovuyutsya-v-yakosti-rezervnogo-dzherela-energiyi-dlya-obyektiv-kritichnoyi-infrastrukturi>
45. Vitalii Khodakivskiyi Dmytro Karpenko “Prospects for using combined heat and power plants and boiler houses to balance the integrated energy system of Ukraine” *Technologies and Engineering*, Vol. 25, No. 6, 2024 DOI: 10.30857/2786-5371.2024.6.3
46. Кабінет Міністрів України. Постанова від 15.12.2023 №1320. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1320-2023-%D0%BF#Text>
47. USAID. Проєкт енергетичної безпеки. Енергетичні комплекси на базі об'єктів муніципальної інфраструктури | Підсумковий семінар. 2024.

V. Khodakivskiyi¹, Ph. D. student, ORCID 0009-0007-3237-3476

D. Karpenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8022-9782

¹**General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine**

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY LEVEL OF COGENERATION UNDER CONDITIONS OF MODERNIZATION AND HEAT SUPPLY SYSTEM BACKUP

This study focuses on evaluating the efficiency of heat and electricity production using various technologies, such as boilers, cogeneration systems, and mini-CHPs based on the Organic Rankine Cycle (ORC). Special attention is given to comparing these systems with existing autonomous and individual energy supply systems. The assessment employs methodological approaches that consider the economic feasibility and technical efficiency of each technology.

The article examines the implementation of cogeneration and Power-to-Heat technologies to optimize the performance of centralized heating systems, aiming to enhance overall efficiency and reduce carbon emissions. Proposed solutions include strategies for attracting investments, evaluating their impact on the efficiency of thermal and electrical networks, minimizing carbon emissions, and optimizing costs. This analysis underscores the potential of modern energy technologies in improving the sustainability of energy systems.

Keywords: cogeneration, ORC cycle, Power-to-Heat, district heating, energy efficiency, heating networks, modernization of energy systems.

Надійшла: 27.02.2025

Received: 27.02.2025

ЕНЕРГЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ СУЧАСНОЮ БУДІВЛЕЮ ГУРТОЖИТКУ УНІВЕРСИТЕТУ ЗА РІЗНИМИ СЦЕНАРІЯМИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ

Будинки є найбільшим споживачем енергії в Європі. Тому будівельний сектор має вирішальне значення для досягнення енергетичних і кліматичних цілей ЄС. Перехід на будівництво будівель з майже нульовим рівнем споживання енергії (NZEB) передбачений Директивами Євросоюзу, де всі нові будівлі зводяться за цим стандартом з 2020 року, що передбачає обов'язкове впровадження нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (НВДЕ). Підвищення енергоефективності існуючого фонду будівель до мінімальних вимог технічно можливе, але широке впровадження подібних проєктів потребує фінансової та організаційної підтримки, що закладено у довгострокові плани дій і стратегії модернізації будівельного фонду як в ЄС, так і в Україні. На противагу цьому, питання підвищення енергоефективності термомодернізованих та новозведених будівель все ще потребує пошуку нових рішень та технічного відпрацювання сценаріїв їх реалізації, особливо зважаючи на прийняті Україною міжнародні зобов'язання, в т.ч. щодо збільшення кількості NZEB будівель. Для залучення фінансування на комплексні проєкти модернізації потрібно проводити енергетичний аудит та виконувати детальні розрахунки технічної і економічної доцільності впровадження комплексу заходів з підвищення енергоефективності за різними сценаріями. Такі багатоваріантні розрахунки варто проводити за допомогою моделювання енергоспоживання будівель з урахуванням особливостей експлуатації будівель, характеристик огорожень, інженерних систем та джерел енергозабезпечення. У роботі на прикладі будівлі сучасного гуртожитку досліджуються сценарії подальшої енергоефективної модернізації будівлі у напрямку до NZEB. Дане питання є актуальним, адже з часом частка термомодернізованих будівель лише зростатиме. Це призводить до необхідності розробки рішень суттєвих енергоефективних поліпшень чи впровадження відновлюваних джерел енергії для забезпечення відповідності вимогам.

Метою роботи є аналіз можливостей підвищення енергоефективності будівлі новозбудованого гуртожитку університету КПІ ім.Ігоря Сікорського із застосуванням спеціалізованих програмних продуктів для розрахунків питомого енергоспоживання, визначення класу енергоефективності за різними сценаріями модернізації з використанням відновлюваних джерел енергії. Методи дослідження: метод порівняльного аналізу, динамічне моделювання, техніко-економічні розрахунки з використанням програмного забезпечення DesignBuilder, PVSol Premium, GeoTSol, MS Excel. Розглянуто відповідні нормативні документи України та ЄС, літературні джерела, статистичні дані та звіти щодо об'єкту дослідження.

Ключові слова: гуртожиток, моделювання енергоспоживання, сонячні панелі, теплові насоси.

Вступ

Будівельний сектор є великим споживачем енергоресурсів як в ЄС, так і в Україні. В ЄС прийнято план дій з реконструкції будівель та скорочення викидів, націлений на досягнення фондом будівель у ЄС кліматичної нейтральності до 2050 р. [1]. Перехід на будівництво будівель NZEB передбачений Директивами Євросоюзу, де всі нові будівлі зводяться за цим стандартом з 2020 року. Щоб підвищити енергетичну ефективність будівель, ЄС створив законодавчу базу, яка включає Директиву про енергетичну ефективність будівель [2] та Директиву про енергоефективність. Нові ініціативи в ЄС передбачають впровадження ZEB до 2030 року [3]. Питання підвищення енергоефективності у світі давно не розглядається як окреме завдання, а є необхідністю для виконання кліматичних зобов'язань міжнародної спільноти. Україна спрямована на адаптацію багатьох положень стратегії Європейський зелений курс (European Green Deal), включаючи декарбонізацію. Відповідно до Концепції зеленого енергетичного переходу України до 2050 року, визначальними напрямками «зеленого переходу» стають саме енергетичні (енергоефективність і відновлювані джерела енергії, посилення електрифікації різних галузей економіки, зменшення використання технологій на базі викопних видів палива) [4]. Відбувається гармонізація нормативно-правової бази України з законодавством ЄС, впроваджуються будівельні норми і стандарти.

Вимоги до енергоефективності будівель постійно зростають та переглядаються, тому для вже термомодернізованих та новозведених будівель існує потреба у пошуку нових рішень та технічного відпрацювання сценаріїв їх реалізації. Питання підвищення енергоефективності існуючого фонду будівель

в Україні до мінімальних вимог нормативних документів технічно вирішені і їх широке впровадження потребує фінансової та організаційної підтримки. На противагу цьому, питання підвищення енергоефективності термомодернізованих та новозведених будівель все ще потребує пошуку нових рішень та технічного відпрацювання сценаріїв їх реалізації. Новозбудовані або термомодернізовані об'єкти у прийнятті рішень подальшого підвищення їх енергоефективності мають свої особливості [4,5]:

- наявне утеплення огорожувальних конструкцій (додаткове утеплення для підвищення теплозахисту вище нормативних вимог, як правило є недоцільним з економічної та технічної точок зору);

- розміщення нового обладнання в обмежених габаритах або потреба спорудження додаткових прибудов для його розміщення;

- використання існуючих інженерних комунікацій, що не розраховані на роботу в енергоефективному режимі (високотемпературні опалювальні прилади, відсутність каналів вентиляції).

Тому основною сферою прикладання зусиль з підвищення енергоефективності таких будівель є запровадження відновлюваних джерел енергії для забезпечення функціонування будівлі, а також заходів з забезпечення ефективної експлуатації інженерних систем та обладнання [4-6].

Для аналізу показників енергоспоживання будівель доцільним є застосування енергетичного моделювання [7] для вибору технічних рішень під час реалізації проєктів модернізації. Для вибору нетрадиційних і відновлювальних джерел фахівці застосовують спеціалізовані програмні продукти [8,9].

Метою даного дослідження є оцінювання можливостей підвищення енергоефективності будівлі новозбудованого студентського гуртожитку, зокрема, використання відновлюваних джерел енергії для теплопостачання будівлі, а також аналіз техніко-економічних та екологічних переваг модернізації за різними сценаріями модернізації у напрямку до будівель з нульовим споживанням енергії. Дослідження проводилося в рамках виконання магістерської дисертації [5].

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання: проведення енергетичного дослідження будівлі гуртожитку із оцінкою існуючого стану; аналіз можливостей підвищення показників енергоефективності будівлі; створення моделі будівлі в DesignBuilder з різними рівнями теплозахисту; динамічне моделювання з оцінкою потреби будівлі в опаленні при різних рівнях теплового захисту; визначення класу енергоефективності; оцінка можливостей використання відновлюваної енергії, розробка стартап-проєкту.

Об'єкт дослідження – будівля гуртожитку №5 КПІ ім. Ігоря Сікорського, розміщена за адресою м.Київ, вул. Олекси Тихого, 5.

Предмет дослідження – процеси енергоспоживання та підвищення енергоефективності будівлі, в тому числі з використанням відновлюваних джерел енергії.

Методи дослідження: порівняльний аналіз, SWOT-аналіз; розрахунково-аналітичний та статистико-економічний методи; для виконання розрахунків використано програмне забезпечення: DesignBuilder, PVSol Premium, GeoTSol, MS Excel. Розглянуто відповідні нормативні документи України та ЄС, літературні джерела, статистичні дані та звіти щодо об'єкту дослідження.

Наукова новизна роботи полягає в дослідженні різних підходів подальшої енергомодернізації новозбудованих будівель, з застосуванням динамічного енергетичного моделювання за різними сценаріями термомодернізації із застосуванням НВДЕ у напрямку до NZEB будівель.

Матеріал і результати досліджень

Дослідження виконувалося в декілька етапів: енергообстеження гуртожитку, в тому числі за допомогою приладового забезпечення, аналіз даних і аналітичні розрахунки в MS Excel, SWOT-аналіз, динамічне моделювання в DesignBuilder; моделювання сонячних панелей і теплових насосів в PVSol Premium, GeoTSol. Запропоновано стартап-проєкт за результатами дослідження.

Енергетичне обстеження будівлі гуртожитку

Студентський гуртожиток для аспірантів та іноземних студентів введено в експлуатацію у 2021 році; вже після цього в Україні прийнято нові вимоги до теплозахисту та рівня енергоефективності будівель [10-12]. Гуртожиток обладнаний кімнатами на три особи й кімнатами сімейного типу, кількість квартир - 128. Будівля гуртожитку збудована каскадом висотністю 9 та 11 поверхів та має цокольний та технічний поверхи; загальна площа будівлі складає 8667 м², опалювальний об'єм - 23490 м³. На цокольному поверсі будівлі розміщено укріття, господарські кімнати, приміщення індивідуального тепlopункту, електрощитової, вузла вводу холодного водопостачання. На першому поверсі розміщені адміністративні приміщення та кафетерій. Теплові навантаження: на опалення 0,189 Гкал/год, на припливно-витяжну вентиляцію 0,022 Гкал/год, на ГВП 0,089 Гкал/год. Система охолодження відсутня. В ІТП встановлено вузол обліку теплової енергії Multical-603, передбачене дистанційне знімання показів з тепло лічильника через GSM модем. Вузол обліку теплової енергії забезпечує облік на потреби опалення, ГВП та вентиляції. ІТП обладнано апаратом магнітної обробки води. Система опалення залежна, двотрубна з поквартирним розведенням на секційні радіатори, з авторегулюванням в сучасному тепловому пункті. Проєктом передбачено встановлення автоматичних регуляторів температури на радіаторах, однак такі відсутні на об'єкті. Цокольний поверх будівлі опалювальний [5,6].



Рисунок 1 – План будівлі: а) 1 поверх, б) 2-11 поверхи [5].

Будівля гуртожитку підключена до ТП 3642. За ступенем надійності електропостачання будівля відноситься до II категорії. Напруга підключення до зовнішніх мереж складає 380В. Система внутрішнього електропостачання трифазна з глухозаземленою нейтраллю. Внутрішня проводка в будівлі виконана мідним кабелем марки ВВГнг 3*2,5 (силове обладнання) та 3*1,5 (освітлювальне обладнання). На об'єкті реалізовано технічний облік електроспоживання з використанням електронних електролічильників типу НІК. У якості освітлювальних приладів використано світлодіодні світильники для місць загального користування та світильники з енергозберігаючими лампами для житлових кімнат. Для забезпечення економії електричної енергії в місцях загального користування передбачене використання датчиків руху.

Структурний розподіл теплоспоживання в помісячному розрізі наведено на рис.2.

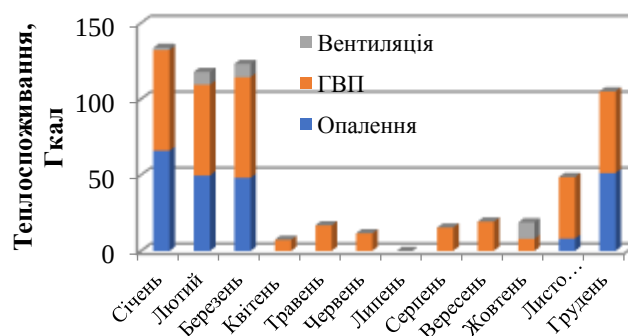


Рисунок 2 – Помісячне теплоспоживання гуртожитку №5

Визначення теплотехнічних характеристик та енергоспоживання будівлі

Для визначення енергопотребі та енергоспоживання використовується ДСТУ 9190:2022 [11], при цьому враховуються зовнішні кліматичні умови [12] і умови внутрішнього мікроклімату, конструктивні особливості огорожень, умови експлуатації і аналізуються тепловтрати через огорожувальні конструкції, вентиляцію, інфільтрацію повітря, теплові надходження від сонця і внутрішніх джерел; враховуються характеристики інженерних систем та ефективність роботи генеруючого обладнання.

Основні показники енергетичних втрат будівлі визначаються на основі теплопередачі непрозорих (стіни, дах, підлога на ґрунті) та прозорих (вікна, балконні двері) огорожень.

Геометричні характеристики, розміри і параметри інженерних мереж, характеристики обладнання обиралися за проектною документацією і уточнювалися під час енергетичного обстеження. Опір теплопередачі світлопрозорих огорожень прийнято рівним 0,75 (м²·К)/Вт. Склад стін (основний фасад вище 2 поверху): облицювальна мозаїчна штукатурка, мінеральна вата 150 мм, керамічна цегла 300 мм, штукатурка. Склад підлоги цокольного поверху: облицювальна плитка на клею, армована стяжка, гідроізоляція, технотекс, обмазувальна бітумна гідроізоляція, монолітна бетонна заливка товщиною 1300 мм. Склад перекриття над проїздом та над виступаючою частиною другого поверху з боку центрального фасаду: чистова підлога, армована стяжка, поліетиленова плівка, монолітна бетонна плита 200 мм, мінераловатні плити товщиною 150 мм, багатшарова декоративна штукатурка. Узагальнені коефіцієнти теплопередачі трансмісією H_D , H_U визначалися за методикою [11], характеристики матеріалів обрано із [13]. Хоча будівля досить сучасна, проте на сьогоднішній день приведені опори теплопередачі окремих існуючих огорожень не відповідають діючим нормативним вимогам [10], див. табл. 1.

Таблиця 1 – Узагальнені коефіцієнти теплопередачі трансмісії

№з/п	Тип ОК	Огороджувальна конструкція	Площа, A_i, m^2	Приведений опір теплопередачі, $m^2 \cdot K/W$	U-фактор, $W/(m^2 \cdot K)$	коефіцієнти		$H_{x,H}, W/K$
						$b_{tr,x,H}$	$b_{tr,x,C}$	
1	Зовнішні стіни цокольного поверху тип - 1	Зовнішні стіни (без вікон), в тому числі орієнтовані на:	285,8605	4,906	0,204	1,0	1,0	58,3
		Пн-Сх	77,969					
		Пд-Сх	64,925					
		Пд-Зх	79,8975					
		Пн-Зх	63,069					
2	Зовнішні стіни першого поверху тип - 2	Зовнішні стіни (без вікон), в тому числі орієнтовані на:	334,48	3,440	0,291	1,0	1,0	97,2
		Пн-Сх	106,179					
		Пд-Сх	79,2					
		Пд-Зх	83,173					
		Пн-Зх	65,928					
3	Зовнішні стіни другого і решти поверхів тип - 3	Зовнішні стіни (без вікон), в тому числі орієнтовані на:	3680,209	3,894	0,257	1,0	1,0	945,0
		Пн-Сх	977,78					
		Пд-Сх	946,8					
		Пд-Зх	862,843					
		Пн-Зх	892,786					
4	Перекриття над проїздом тип - 1	перекриття над проїздом	49,7122	4,609	0,217	1,0	1,0	11,61
5	Перекриття над проїздом тип - 2	перекриття над проїздом	201,4	3,690	0,271	1,0	1,0	44,05
6	Дахове перекриття	горищне перекриття неопалюваного горища	735,0	5,986	0,167	0,9	0,0	121,41
7	Вікна	Вікна, в тому числі орієнтовані на:	418,748	0,700	1,429	1,0	1,0	598,2
		Пн-Сх	18,571					
		Пд-Сх	89,1					
		Пд-Зх	155,207					
		Пн-Зх	155,87					
8	Двері	Двері, в тому числі орієнтовані на:	107,691	0,700	1,429	1,0	1,0	153,8
		Пн-Сх	82,477					
		Пд-Сх	0					
		Пд-Зх	9,557					
		Пн-Зх	15,657					
9	Підлога	Підлога на ґрунті	559,7	7,912	0,126			153,8
							$\sum H_{x,H}$	2100,4

Енергоспоживання на потреби опалення, охолодження, вентиляції, ГВП, освітлення розраховано за методикою стандарту ДСТУ 9190:2022 [11]. Під час розрахунку прийнято умови мікроклімату: внутрішня розрахункова температура 20°C, в черговому режимі – 17°C (на опалення), 26°C (на охолодження); графік опалення та охолодження - 112 год/тиждень. Величину повітрообміну при вентиляції, з урахуванням інфільтрації, прийнято на рівні мінімального значення кратності повітрообміну за [14]: $n=0,8 \text{ год}^{-1} \square 0,8 = 0,64 \text{ год}^{-1}$. Загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні:

$$EP_{use} = (EP_{H,use} + EP_{C,use}) / A_f = (521809,57 + 5067,21) / 8667 = 60,79 \text{ кВт} \square \text{ год} / m^2.$$

Граничне значення енергоспоживання 75 кВт·год/м² [14], отже будівля гуртожитку має клас енергоефективності – С. Співвідношення трансмісійних та вентиляційних тепловтрат (31%:69%).

Результати розрахунку тепловтрат наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку тепловтрат через огорожувальні конструкції за ДСТУ 9190:2022

Найменування	кВт·год/рік	%
Тепловтрати через стіни	93241	52
Тепловтрати через перекриття	15003	9
Тепловтрати через підлогу на ґрунті	5993	3
Тепловтрати через вікна	50685	29
Тепловтрати через двері	13035	7

Хоча теплотехнічні характеристики огорожень не відповідають новим вимогам, економічно не доцільно проводити повторне утеплення та заміну вікон даної будівлі, оскільки клас енергоефективності залишається в межах допустимих норм. Доцільніше оцінити можливість використання відновлюваних джерел енергії, а також провести заходи для автоматичного регулювання процесів енергоспоживання, включаючи системи опалення, ГВП, освітлення. Також доцільно розглянути захід зі встановлення припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією теплоти витяжного повітря, зокрема в приміщеннях місць загального користування, оскільки втрати з вентиляцією складають майже 70% від загальних тепловтрат.

Енергетичне моделювання різних сценаріїв

Для визначення найкращих комбінацій сценаріїв енергоефективної модернізації будівлі проведено енергетичне моделювання будівлі за допомогою програмного продукту DesignBuilder. Програма дозволяє виконати енергетичний аналіз, а також надає цифрове представлення всіх фізичних і функціональних елементів будівлі у 3D моделі [5]. На рис. 3 показано зовнішній вигляд побудованої моделі. Досліджувані заходи стосуються в першу чергу енергоефективної модернізації інженерних систем будівлі.

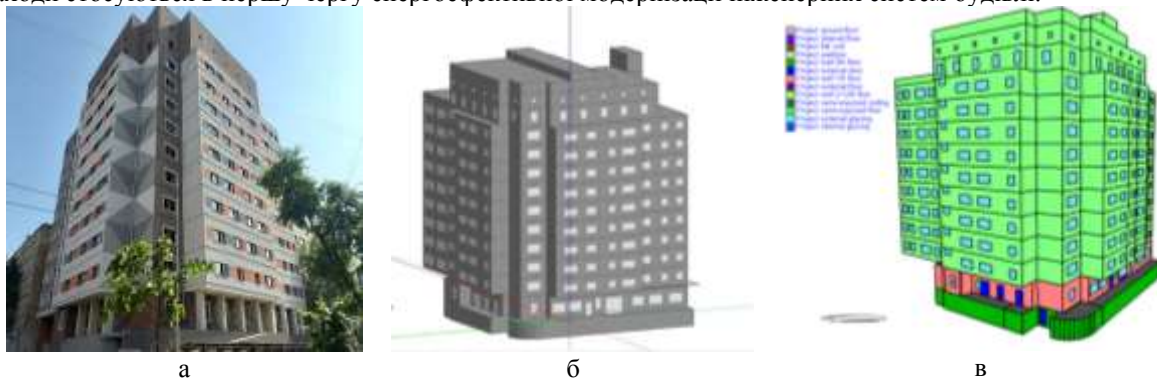


Рисунок 4 – Моделювання енергетичних характеристик в програмному продукті DesignBuilder
а) зовнішній вигляд фасаду будівлі; б) 3D модель; в) виділення окремих поверхонь огорожень

Запропоновано розглянути наступні варіанти енергоефективної модернізації будівлі:

- встановлення: місцевого авторегулювання подачі теплоносія на прилади системи опалення; запровадження графіку автоматичного регулювання подачі теплоносія до системи опалення; системи віддаленого моніторингу енергетичних та температурних параметрів у будівлі;
- влаштування рекуперації теплоти витяжного повітря у будівлі;
- використання теплового насоса для часткового покриття потреби в охолодженні та опаленні;
- встановлення фотоелектричних панелей на даху будівлі для часткового покриття потреби в електричній енергії.

У програмному середовищі DesignBuilder було створено базову (baseline) модель будівлі гуртожитку з фактичними характеристиками інженерних систем і огорожувальних конструкцій та умов експлуатації, що відповідає нормативам (оскільки відсутня достатньо повна інформація періоду фактичної експлуатації будівлі). Результати моделювання енергопотреб та енергоспоживання будівлі для базової та запропонованої моделей у DesignBuilder наведено в табл. 3. Клас енергоефективності наведено з ілюстративною метою для порівняння сценаріїв, оскільки методика розрахунку в DesignBuilder [7] дещо відрізняється від методики ДСТУ [11], за результатами застосування якої має визначатися клас (зокрема, в програмному продукті опалювальна площа визначається за зовнішніми обмірами).

Модель запропонованого енерговикористання розглядає такі сценарії енергоефективної модернізації:

Сценарій 1. Запровадження графіку регулювання опалення та системи енергомоніторингу;

Сценарій 2. Впровадження рекуперації теплоти витяжного повітря;

Сценарій 3. Впровадження одночасно графіку регулювання опалення та рекуперації теплоти витяжного повітря.

Таблиця 3 – Результати моделювання у програмному продукті DesignBuilder

№	Найменування показника/сценарію	Базова модель, кВт·год/рік	Пропонована модель, кВт·год/рік		
			Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
1	Енергопотреба для опалення, кВт·год/рік	306 601,67	299 120,08	72 357,95	60 446,13
2	Енергопотреба для охолодження, кВт·год/рік	96 223,32	96 223,32	95 658,38	95 658,25
3	Енергопотреба для гарячого водопостачання, кВт·год/рік	256 414,11	256 414,11	256 414,11	256 414,11
4	Питоме енергоспоживання на опалення, охолодження, EP_{use} , кВт·год/м ²	46,29	45,32	15,69	14,13
5	Δ (від базової моделі), %	-	-2,11	-66,12	-69,48
6	Клас енергоефективності	B	B	A	A

Аналіз можливостей використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії

В таблиці 4 для досліджуваної будівлі проаналізовано принципову можливість застосування відновлюваних джерел енергії для енергопостачання будівлі гуртожитку, отриманої з різних джерел.

Таблиця 4 – Види відновлюваних джерел та можливість їх застосування в гуртожитку №5

№з/п	Вид відновлюваного джерела енергії	Наявність можливості застосування	Потенціал використання	Примітка
1	2	3	4	5
1	Сонячна енергія	✓	Сонячні панелі та сонячні колектори	Розміщення на: даху будівлі, вертикальних огорожувальних конструкціях
2	Вітрова енергія	✓	Вітро-електростанція	Розміщення на: даху будівлі
3	Аеротермальна енергія	✓	Теплові насоси повітря/повітря, повітря/вода	Розміщення: - зовнішні блоки – на даху будівлі - внутрішні блоки – стельова система опалення/ охолодж. першого поверху та місць загального користування.
4	Геотермальна енергія	✗	✗	Щільність міської забудови не дозволяє розмістити достатній ґрунтовий контур
5	Гідротермальна енергія	✗	✗	Впровадження потребує влаштування низки свердловин та отримання ліцензії на користування надрами
6	Енергія біомаси (за винятком деревини)	✗	✗	Розміщення будівлі в центральному районі міста зі щільною забудовою, а також близькість розміщення до залізниці, що несе екологічне навантаження є екологічною перешкодою для створення потужностей на біомасі. Додатково, транспортна логістика та необхідність створення запасу палива є перешкодою до позитивного рішення
7	Енергія газу з органічних відходів	✗	✗	Відсутня достатня кількість відходів. Хоча такий вид ресурсу може бути розглянутий для університету цілому та міг би бути реалізований на одному з господарських майданчиків університету
8	Енергія газу каналізаційно-очисних станцій	✗	✗	Потребує погодження з ПрАТ «АК «Київводоканал». Власні очисні каналізаційні споруди відсутні
9	Енергія біогазів	✗	✗	✗
10	Гідроенергія	✗	✗	✗

Примітка: ✓ - існує можливість застосування; ✗ - відсутня можливість застосування

Зважаючи на аналіз можливості і доцільності застосування різних джерел відновлюваної енергії для досліджуваної будівлі розглядаються наступні сценарії:

Сценарій 4. Впровадження фотовольтаїчної системи на даху будівлі.

Сценарій 5. Впровадження теплонасосної системи повітря-повітря.

Сценарій 6. Впровадження фотовольтаїчної системи та теплонасосної системи повітря-повітря.

Для вказаних сценаріїв з відновлюваними джерелами енергії використано програмне середовище PVSol Premium (для моделювання фотоелектростанції) та GeoTSol (для моделювання системи з тепловими насосами). За базову модель були використані результати динамічного моделювання споживання з DesignBuilder.

У зв'язку з необхідністю отримання ліцензії, у разі продажу надлишку електроенергії в мережу, розглядається варіант створення автономної фотоелектричної системи, що задовольнятиме лише власний попит на електричну енергію. У випадку надлишку виробленої енергії вона резервуватиметься в акумуляторних батареях.

Фотоелектричну систему запропоновано розмістити на даху будівлі (66 модулів, див. рисунок 5). Оскільки по периметру даху влаштований парапет на висоту 1,5 м, то для уникнення затінення сонячні панелі необхідно підняти на висоту 1,5 м над дахом. Результати моделювання наведено в табл.

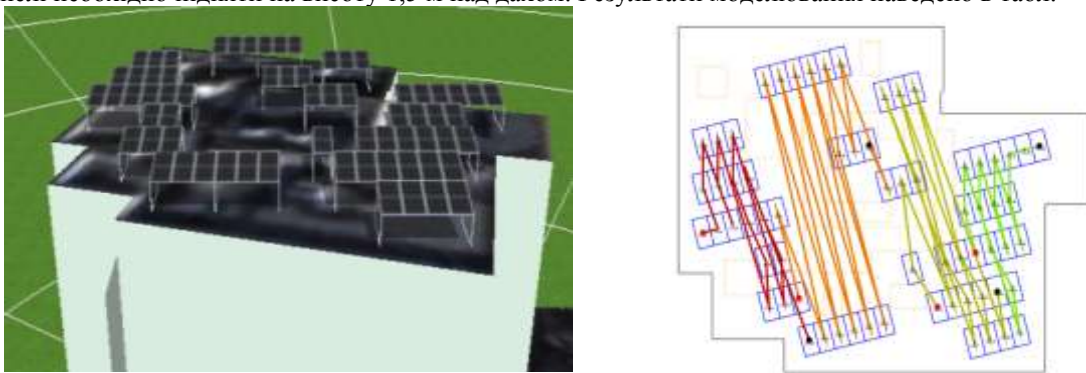


Рисунок 4 – Моделювання фотовольтаїчних систем
а) загальний вигляд розміщення сонячних панелей; б) план розміщення модулів

Таблиця 5 – Результати моделювання у PVSol Premium

PV система		Одиниця вимірювання
Потужність PV генератора	36,3	кВт·пік
Очікувана річна генерація PV генератора	28 614	кВт·год
Коефіцієнт продуктивності (PR)	89,6%	%
Уникнення викидів CO ₂ *	12 819	кг/рік
Рівень самодостатності		
Загальне електроспоживання будівлі	80 025	кВт·год/рік
Покрите мережею	51 894	кВт·год/рік
Рівень самодостатності	35,7	%

*Примітка: Під час розрахунку скорочення викидів використано перевідний коефіцієнт 0,448 тон/МВт·год (рекомендації Міжнародного енергетичного агентства IEA [16]).

В програмному комплексі GEOT*SOL проведено моделювання забезпечення потреби в тепловій енергії з використанням теплового насоса для двох варіантів: повітряний або ґрунтовий тепловий насос; визначений термін окупності заходу становить близько 15 років.

Для моделювання теплових насосів використано дані про річне теплоспоживання об'єктом для потреб опалення для базової моделі з DesignBuilder 310 Гкал. Відповідно до помісячних фактичних даних по теплоспоживанню для потреб вносимо дані до програми. У такому разі теплове навантаження системи складає 233 кВт. Керуючись цим значенням обираємо з бази даних програми повітряний тепловий насос Dimplex – Glen Dimplex Deutschland GmbH з номінальною тепловою потужністю 40 кВт, а також обираємо режим роботи з додатковим джерелом теплової енергії від централізованої мережі потужністю 220 кВт.

Керуючись значенням теплового навантаження будівлі обираємо з бази даних програми ґрунтовий тепловий насос Dimplex – Glen Dimplex Deutschland GmbH з номінальною тепловою потужністю 90 кВт, а також обираємо режим роботи з додатковим джерелом теплової енергії від централізованої мережі потужністю 150 кВт. Для роботи насоса в такому режимі потрібна наявність 35 свердловин глибиною 96м.

Таблиця 6 – Порівняння показників роботи теплових насосів за результатами моделювання

Найменування показника	Значення показника	
	Повітряний	Грунтовий
Теплопостачання від теплового насоса	96 367 кВт*год (27%)	234 831 кВт*год (65%)
Теплопостачання від додаткового джерела теплоти	264 343 кВт*год (73%)	125 879 кВт*год (35%)
SPF теплового насоса	3,53	4,5
SPF системи з тепловим насосом	1,58	2,8

Практичне впровадження ґрунтового колектора для даного об'єкту мало ймовірне через густину існуючої забудови, необхідність отримання для юридичних осіб дозволів на буріння свердловин тощо. Тому у якості рекомендації до впровадження запропоновано використовувати теплові насоси типу повітря-повітря з покриттям дефіциту в тепловій енергії від централізованого джерела.

Виконано техніко-економічну оцінку заходів з підвищення енергоефективності та обґрунтовано доцільність впровадження заходів за сценаріями 1 та 2, оскільки вони мають прийнятні терміни окупності (простий термін окупності близько 5,5 років) та забезпечують суттєву економію теплової енергії. Щодо заходів за сценарієм 4, то з економічних міркувань він є доцільним при значенні тарифу на електроенергію вище 15 грн/кВт*год. Захід за сценарієм 5 та 6, за діючими тарифами виявилися не рентабельними, оскільки мають термін окупності більше 15 років. До його розгляду варто повернутися після підвищення тарифів.

Стартап-проект: система віддаленого моніторингу

Ідея проекту полягає у створенні середовища для керування нерухомістю (Facility management). Продукт окрім властивостей збору, накопичення, аналізу інформації, управління обладнанням формує повноцінне місце енергоменеджера, а також може бути інтегроване до інших систем управління.

Мета – зменшення енергоспоживання шляхом створення сучасної системи енергоменеджменту, автоматизації збору, обробки, зберігання та представлення інформації відповідним службам у зручному для оцінки та прийняття рішень вигляді. Конкретна ціль проекту – створити систему віддаленого енергомоніторингу та управління енерговикористанням об'єктів та провести її пілотне впровадження в гуртожитку №5. Зручним доповненням продукту є мобільний додаток.

Ціннісні пропозиції, які пропонує стартап проект наступні:

- енергомоніторинг; моніторинг параметрів в середині приміщень та технологічних процесів (температура, CO₂, відновна вологість, тиск, витрата тощо);
- автоматизоване робоче місце енергоменеджера;
- керування нерухомістю (Facility management).

Споживча цінність стартап проекту полягає у наступному: покращення задоволення існуючих потреб щодо аналізу та моніторингу енергоспоживання; формування та задоволення нових потреб щодо керування нерухомістю включаючи повний цикл завдань Facility management з особливою увагою до питань енергетичного менеджменту. Нижче в табл. 7 представлено матрицю SWOT-аналізу.

Таблиця 5.4 – Матриця SWOT-аналізу

Сильні сторони (S): – сучасна ідея, відповідає Зеленому курсу ЄС, а також ЗУ «Про енергоефективність» – дозволяє скоротити витрати від 10% – може бути інтегрована з іншими системами/приладами/датчиками – підтримка клієнтів, мобільний додаток – власні датчики, бездротова технологія	Слабкі сторони (W): – вартість обладнання – невелика команда – потреба у додатковому навчанні членів команди – відсутність власної виробничої бази для збирання приладів
Можливості (O): – вихід на міжнародний ринок – розширення функціоналу	Загрози (T): – нестабільний курс гривні – невизначеність у зв'язку з військовим станом і затримка інвестицій міжнародних партнерів

Висновки: виконано енергообстеження будівлі гуртожитку університету та енергетичне моделювання енергоспоживання. Виявлено значний потенціал подальшої енергоефективної модернізації новозбудованих будівель в напрямку досягнення енергоефективності на рівні будівель з близьким до нульового енергоспоживання. Впровадження заходів призведе до скорочення теплоспоживання для потреб опалення, заміщення електричної енергії у системі електропостачання відновлювальними джерелами енергії. Зниження споживання енергоресурсів сприяє непрямому зменшенню викидів парникових газів на джерелі генерації енергії. Запропоновано створення інноваційного продукту з управління нерухомістю, що включає питання енергомоніторингу та керування інженерними системами.

Список використаної літератури

1. О.Гарасевич. Що треба знати про нову редакцію Директиви ЄС про енергетичну ефективність будівель. АЕМУ, 2024. Режим доступу: <https://enefcities.org.ua/novyny/scho-treba-znaty-pro-novu-redaktsiyu-dyrektyvy-yes-pro-energetychnu-efektyvnist-budivel/>
2. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
3. П. Шамілов. Огляд вимог nZEB В Європі. Аналітичний звіт. – К.: Опора, 2024, 59 с. Режим доступу: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf
4. Шевченко О.М., Шевченко Д.І. Енергетичне моделювання варіантів підвищення енергоефективності будівлі після термомодернізації/Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. У 2-х т. : Матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених і студ., м. Київ, 25-28 квітня 2023 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», с. 220-221.
5. Шевченко Д.І. Підвищення енергоефективності гуртожитку №5 КПІ ім. Ігоря Сікорського за рахунок використання енергії з альтернативних джерел / Магістерська дисертація за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – К.: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2023 – 171с. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66590>
6. Шевченко Д.І., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Моделювання енергоспоживання сучасної будівлі гуртожитку університету за різними сценаріями підвищення енергоефективності з використанням програмних засобів // Збірник наук. праць X Міжнародної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'24», [Київ, 26-27 листопада 2024 р.], с.167-169.
7. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials>.
8. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. 2014. № 80. С. 68 – 72.
9. Онлайн калькулятор вироблення електричної енергії CEC Photovoltaic geographical information system. Режим доступу: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
10. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
11. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
12. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія.
13. ДСТУ 9191:2022 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.
14. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція, кондиціонування
15. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
16. CO2-Emission from Fuel Combustion 2016, pp. 122-124. Режим доступу: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/co2-emissions-from-fuel-combustion-2016_co2_fuel-2016-en

O. Shevchenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-9304-5432

D. Shevchenko¹, Master student, ORCID 0009-0004-9048-5837

M. Shovkaliuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**ENERGY MODELING OF ENERGY CONSUMPTION BY A MODERN
UNIVERSITY BUILDING UNDER VARIOUS SCENARIOS OF ENGINEERING
SYSTEMS MODERNIZATION**

Buildings are the largest energy consumers in Europe. The construction sector is therefore crucial for achieving the EU's energy and climate goals. The transition to nearly zero-energy buildings (NZEB) is foreseen by the EU Directives, where all new buildings are to be built according to this standard from 2020, which requires the mandatory introduction of non-traditional and renewable energy sources (NVDE). Improving the energy efficiency of the existing building stock to the minimum requirements is technically possible, but the widespread implementation of such measures requires financial and organizational support, which is included in long-term plans and strategies for the modernization of the building stock in both the EU and Ukraine. In contrast, the issue of increasing the energy efficiency of thermally modernized and newly constructed buildings still requires the search for new solutions and technical development of their implementation scenarios, especially given the

international commitments adopted by Ukraine, including an increase in the number of NZEB buildings. To attract funding for complex modernization projects, it is necessary to conduct an energy audit and perform detailed calculations of the technical and economic feasibility of implementing a set of measures to increase energy efficiency under flawless scenarios. Such multivariate calculations should be carried out using modeling of building energy consumption, taking into account the features of building use, characteristics of enclosures, engineering systems and energy supply sources. In the work, scenarios for further energy-efficient modernization of the building towards NZEB are studied using the example of a modern dormitory building. This issue is relevant, since over time the share of thermally modernized buildings will only increase. This is necessary before the need to develop solutions for significant energy-efficient improvements or the introduction of renewable energy sources to ensure compliance with the requirements.

The method of work is the possibility of analyzing the increase in energy efficiency of buildings in a newly built dormitory of the KPI University. Igor Sikorsky using specialized software products for calculating specific energy consumption, determining the energy efficiency class according to general scenarios of modernization using renewable energy. Research methods: comparative analysis method, dynamic modeling, technical and economic calculations using DesignBuilder, PVSol Premium, GeoTSol, MS Excel software. Relevant regulatory documents of Ukraine and the EU, literary sources, statistical data and reports on the research object were considered.

Keywords: dormitory, energy consumption modeling, solar panels, heat pumps

References

1. O. Garasevych. What you need to know about the new version of the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. AEMU, 2024. Access mode: <https://enefcities.org.ua/novyny/scho-treba-znaty-pro-novu-redaktsiyu-dyrektyvy-yes-pro-energetychnu-efektyvnist-budivel/>
2. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
3. P. Shamilov. Review of nZEB requirements in Europe. Analytical report. – K.: Opora, 2024, 59 p. Access mode: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf
4. Shevchenko O.M., Shevchenko D.I. Energy modeling of options for increasing the energy efficiency of a building after thermal modernization/Current problems of scientific support of energy. In 2 vols.: Materials of the XX International Scientific-Practical Conference of Young Scientists and Students, Kyiv, April 25-28, 2023 – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing House “Polytechnics”, p. 220-221.
5. Shevchenko D.I. Increasing the energy efficiency of dormitory No. 5 Kyiv Polytechnic Institute Igor Sikorsky due to the use of energy from alternative sources / Master's thesis in speciality 141 Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023 – 171p. Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66590>
6. Shevchenko D.I., Shevchenko O.M., Shovkalyuk M.M. Modeling energy consumption of a modern university dormitory building according to different scenarios of increasing energy efficiency using software // Collection of scientific papers of the 10th International Conference “Energy Management: State and Development Prospects – PEMS’24”, [Kyiv, November 26-27, 2024], pp.167-169.
7. DesignBuilder Simulation + CFD Training Guide. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.designbuilder.co.uk/training/online-learning/tutorials>.
8. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models of buildings for energy consumption assessment. Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific papers. 2014. No. 80. P. 68 – 72.
9. Online calculator of electric energy generation of photovoltaic power plant Photovoltaic geographical information system. Access mode: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
10. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings
11. DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
12. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, and fire. Building climatology.
13. DSTU 9191:2022 Methods for selecting thermal insulation material for building insulation. Kyiv, 2022, 63 p.
14. DBN V.2.5-67:2013 Heating, ventilation, air conditioning.
15. On approval of the Minimum requirements for the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 10/27/2020. No. 260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
16. CO₂-Emission from Fuel Combustion 2016, pp. 122-124. Режим доступу: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/co2-emissions-from-fuel-combustion-2016_co2_fuel-2016-en

Надійшла: 13.03.2025

Received: 13.03.2025

ДИНАМІКА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПІНОПОЛІУРЕТАНОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЛІ

Проблематика: Енергетична незалежність держави є ключовим елементом її безпеки. Сучасні реалії вимагають мінімізації енергоспоживання, що сприятиме більш ефективній заміні традиційних джерел енергії. Саме тому, експериментально-розрахункові дослідження теплофізичних параметрів термоізоляційних матеріалів важливі та актуальні в проблематиці енергоефективності та потребують більшої уваги в галузі наук.

Мета дослідження. Дослідити вплив терміну експлуатації на коефіцієнт теплопровідності поліуретанової теплоізоляції огороджувальної конструкції.

Методика реалізації. Методика полягає у вимірюванні фактичних параметрів у сталому тепловому режимі за певних температурно-вологісних умов по обидва боки огороджувальної конструкції. А саме, поверхневої густини теплового потоку через конструкцію, температур внутрішньої і зовнішньої поверхонь на термічно однорідних ділянках за допомогою контактних вимірювальних засобів та температур внутрішнього і зовнішнього повітря, що оточує конструкцію.

Результати дослідження. Проведено аналіз та обробку експериментальних даних температурних коливань та розподілу густини теплового потоку на термомодернізованій ділянці стінової огороджувальної конструкції, утепленої поліуретановою теплоізоляцією, за період 7–8 січня 2024 року. Також, проведено порівняння фактичного коефіцієнта теплопровідності поліуретанової теплоізоляції з результатами досліджень за попередні роки.

Висновки. Поліуретанова теплоізоляція володіє належними теплоізоляційними властивостями та є ефективним теплоізолятором. Отримані результати є важливими для прогнозування довговічності та ефективності поліуретанових матеріалів у теплоізоляційних застосуваннях та демонструють важливість довгострокових експериментальних досліджень для оцінки змін теплофізичних властивостей матеріалів у реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: енергоефективність; тепла ізоляція; тепловий потік, коефіцієнт теплопровідності, огороджувальна конструкція

Вступ.

Сучасний стан енергетики України підкреслює важливість дослідження теплофізичних характеристик зовнішніх огороджувальних конструкцій (ОК) стін, особливо в контексті енергоефективності та зменшення енергетичних втрат у будівлях. Оскільки країна стикається з нестабільністю електропостачання та обмеженням ресурсів, ефективне використання енергії в будівлях набуває критичного значення.

В умовах дефіциту енергоресурсів і складнощів в енергосистемі, покращення теплоізоляції та дослідження теплових властивостей стінових ОК сприятимуть значному зменшенню енерговитрат на опалення та охолодження приміщень. Це допоможе мінімізувати залежність від зовнішніх джерел енергії, зменшити навантаження на електромережі, які вже працюють на межі можливостей, та підвищити стійкість до можливих енергетичних криз. Тому, дослідження теплофізичних характеристик ОК є ключовим напрямком для підвищення енергоефективності будівель та забезпечення більш раціонального використання енергетичних ресурсів в умовах їх обмеженості.

Мета роботи.

Дослідити вплив терміну експлуатації на коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу (поліуретан) ОК.

Об'єкт дослідження.

Для дослідження було обрано будівлю, що потребує термореновації. Це триповерхова громадська споруда, введена в експлуатацію в 1973 році, збудована за типовим проектом № 416-3-3/70 (1966 р.) під назвою "Універсальна 3-поверхова споруда розміром 18х60 м для інженерних корпусів, проектно-конструкторських бюро та адміністративних приміщень". Термомодернізація була проведена шляхом заміни старих вікон у приміщеннях на сучасні склопакети та влаштування теплоізоляційних покриттів з різних видів матеріалів на частині площі зовнішньої поверхні огорож на північному фасаді будівлі (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема утеплення ОК верхнього поверху корпусу № 1 ІТТФ НАН України

Для експериментального визначення впливу погодних умов на температурний стан будівельних конструкцій з утеплювачем було використано вимірювальний комплекс, що включає датчики, вторинні прилади і персональний комп'ютер [1].

Методика дослідження. Основною теплофізичною характеристикою теплоізоляційних матеріалів є коефіцієнт теплопровідності, який фактично визначає приведений опір теплопередачі через огорожувальну конструкцію.

Для запобігання впливу сонячної радіації найбільш стабільні експериментальні дані від датчиків температури і теплового потоку, отримані в нічний час.

При розрахунку тепловтрат через огорожувальні конструкції будівель і споруд зазвичай використовують значення їхнього опору теплопередачі:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (1)$$

де α_1 - коефіцієнт теплопередачі від внутрішнього повітря до огорожувальної конструкції (8,7 Вт / м² · К);

α_2 - коефіцієнт теплопередачі від огорожувальної конструкції до зовнішнього повітря (23 Вт / м² · К);

δ_i - товщина шару огорожувальної конструкції, м;

λ_i - коефіцієнт теплопровідності, Вт / м² · К.

Згідно з [2, 3], фактичні теплоізоляційні властивості можна оцінити методом теплових випробувань у натурних умовах. Цей метод полягає у вимірюванні фактичних параметрів у сталому тепловому режимі за певних температурно-вологісних умов по обидва боки ОК.

Зокрема:

- поверхневої густини теплового потоку через конструкцію та температур внутрішньої і зовнішньої поверхонь на термічно однорідних ділянках за допомогою контактних вимірювальних засобів;

- температур внутрішнього і зовнішнього повітря, що оточує конструкцію.

На основі отриманих даних розраховують коефіцієнт теплопровідності відповідно до розрахункових формул [2].

Для кількісного аналізу теплообміну між приміщенням і навколишнім середовищем був використаний існуючий комплекс для дослідження тепловтрат. Він включає перетворювачі теплових потоків із вбудованими платиновими термометрами опору (ПТП-ПТО), мідні термометри опору (МТО) ТСМ-205, а також вторинні прилади для збору, передачі та обробки експериментальних даних: УКТ-38 (для температурних датчиків) і «Експерт» (для перетворювачів теплового потоку).

До комплексу входять адаптери для зв'язку вторинних приладів із комп'ютером. Схему збору, передачі та запису даних на комп'ютер наведено на рисунку 2. Цей вимірювальний комплекс дозволяє в реальному часі визначати густину теплових потоків на поверхнях і температурні характеристики цих поверхонь.

Оцінка тепловтрат, аналіз та інші теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій здійснюються шляхом встановлення ПТП-ПТО та МТО ТСМ205 на поверхні цих конструкцій.

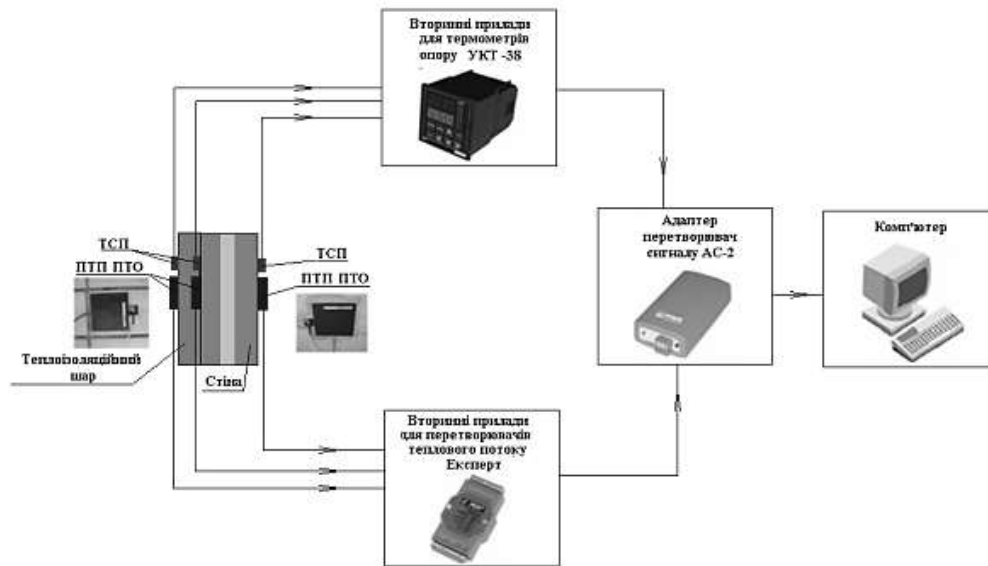


Рисунок 2 – Принципова схема існуючого комплексу дослідження тепловтрат

Оскільки температурне поле огорожувальних конструкцій і розподіл густини теплового потоку на їх поверхнях мають значну нерівномірність, датчики ПТП-МТО та МТО розташовуються на внутрішній і зовнішній поверхнях стін, а також між стіною та утеплювачем у випадку утеплення. Вони встановлюються на одній осі, перпендикулярній до поверхні стіни, поруч один з одним. Детальний опис геометричного розташування датчиків та методики збору й обробки даних наведено в джерелі [4].

Результати дослідження. Експериментальні дані були зібрані за січень-лютий 2024 року. Для розрахунку був обраний період часу з 18:00 7 січня 2024 року по 6:00 8 січня 2024 року, так як це нічний період часу за якого температурний напір не менший ніж 15 К ($\Delta T_{\text{НС}} \geq 15\text{K}$) [5], відсутній вплив сонячного випромінювання і персоналу.

Експериментальні дані коливань густин теплового потоку та температур наведено на рисунках 3 та 4.

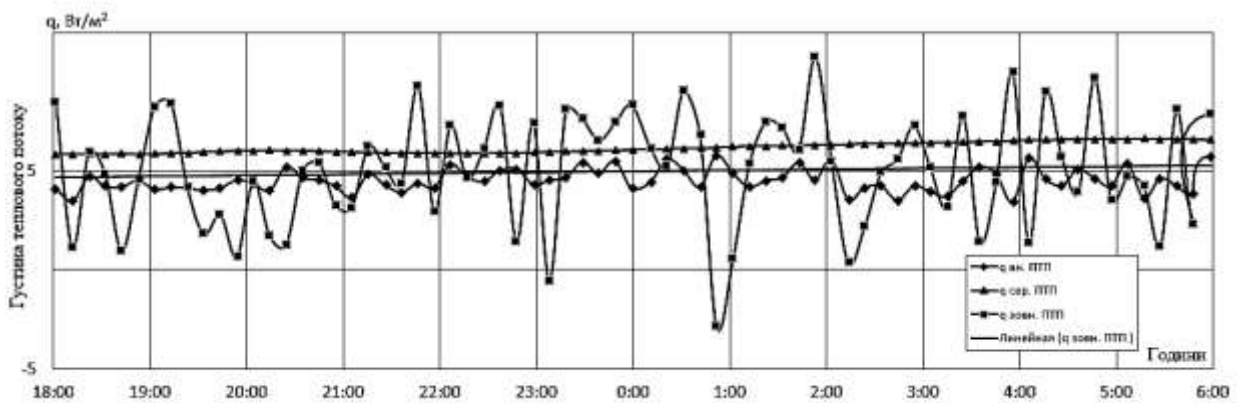


Рисунок 3 – Коливання густини теплового потоку термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої поліуретановою теплоізоляцією

Далі було проведено розрахунок коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційного матеріалу, експлуатаційний період якого 11 років, відповідно до розрахункових формул [2].

На рисунку 5 відображено часову динаміку зміни експериментально-розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності поліуретану. Дані за попередні роки взяті з [6, 7].

На рисунку спостерігається поступове зростання коефіцієнта теплопровідності в перші роки експлуатації. З 2013 року до 2019 року коефіцієнт теплопровідності поліуретану зріс з 0,025 Вт/(м·К) до 0,029 Вт/(м·К). Це свідчить про зниження теплоізоляційних властивостей матеріалу з часом, ймовірно, через старіння, вплив зовнішніх факторів (температури, вологості, УФ-випромінювання) або деградацію структури.

Після 2019 року спостерігається відносна стабільність коефіцієнта теплопровідності на рівні 0,03 Вт/(м·К). Це може свідчити про те, що після початкового періоду старіння матеріал досяг стабільного стану і його подальша деградація сповільнюється або зупиняється.

Найбільший приріст теплопровідності відбувся між 2013 та 2019 роками (на 0,004 Вт/(м·К), або 16%). У період з 2019 по 2024 рік зміна склала лише 0,001 Вт/(м·К), тобто 3,4%. Це підтверджує гіпотезу про нелінійну динаміку деградації та нелінійне «старіння» теплофізичних параметрів поліуретану.

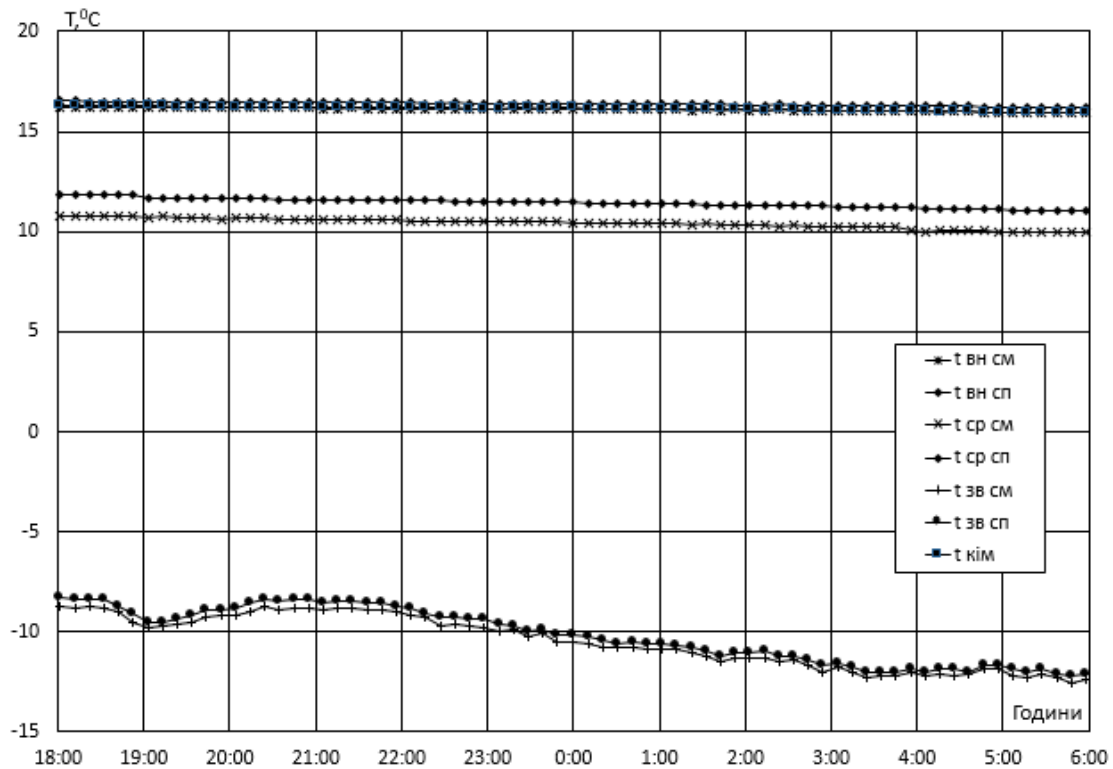


Рисунок 4 – Коливання температур термомодернізованої ділянки стінової огорожувальної конструкції утепленої поліуретановою теплоізоляцією

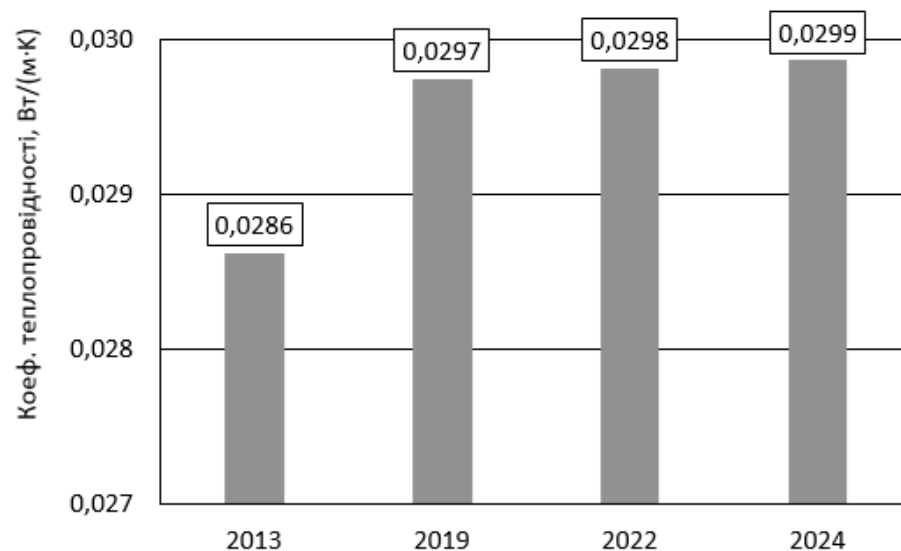


Рисунок 5 – Динаміка зміни коефіцієнта теплопровідності поліуретану за 11 років експлуатації

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що в перші роки експлуатації, спостерігається поступове збільшення теплопровідності поліуретану, що може свідчити про деградацію теплофізичних параметрів та деградацію структури матеріалу під впливом експлуатаційних умов.

Однак, в останні роки цей показник стабілізувався, що може вказувати на досягнення матеріалом стабільного стану. Це свідчить про належні теплоізоляційні властивості поліуретану та про те, що цей матеріал є ефективним теплоізолятором.

Отримані результати є важливими для прогнозування довговічності та ефективності поліуретанових матеріалів у теплоізоляційних застосуваннях та демонструють важливість довгострокових експериментальних досліджень для оцінки змін теплофізичних властивостей матеріалів у реальних умовах експлуатації.

A. Danishevskiy¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0002-6166-0999

B. Basok¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8935-4248

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

DYNAMICS OF THERMAL CONDUCTIVITY IN POLYURETHANE INSULATION OF THE BUILDING ENCLOSING STRUCTURE

Background: Energy independence of the state is a key element of its security. Modern realities require minimisation of energy consumption, which will contribute to a more efficient replacement of traditional energy sources. That is why experimental and computational studies of the thermophysical parameters of thermal insulation materials are important and relevant in the field of energy efficiency and require more attention in the field of science.

The purpose of the study: To investigate the effect of service life on the thermal conductivity coefficient of polyurethane thermal insulation of the building enclosing structure.

Methods: The actual parameters were measured in a steady-state thermal regime under certain temperature and humidity conditions on both sides of the building enclosing structure. Namely, the surface density of the heat flux through the structure, the temperatures of the inner and outer surfaces in thermally homogeneous areas using contact measuring instruments and the temperatures of the internal and external air surrounding the structure.

Results: The experimental data of temperature fluctuations and heat flux density distribution on the thermally modernised section of the wall enclosing structure insulated with polyurethane thermal insulation for the period of 7-8 January 2024 were analysed and processed. Also, the actual thermal conductivity coefficient of polyurethane insulation was compared with the results of research for previous years.

Conclusions: polyurethane thermal insulation has adequate thermal insulation properties and is an effective heat insulator. The obtained results are important for predicting the durability and efficiency of polyurethane materials in thermal insulation applications and demonstrate the importance of long-term experimental studies to assess changes in the thermal and physical properties of materials in real operating conditions.

Keywords: energy efficiency; thermal insulation; heat flow, thermal conductivity coefficient, enclosing structure

References

1. B.I. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk. Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Variable thermal expansion of the enclosing structures of a part of the floor of an existing administrative building and monitoring of heat losses during its long-term operation. Kyiv. Science and Innovation. 2013. T. 9. № 2. pp. 18-21.
2. DSTU B V.2.6-101: 2010 Method for determining the heat transfer resistance of enclosing structures. Valid from 20.01.2010. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 84 p.
3. MVV No. 081/24-0778-11 Metrology. Resistance to heat transfer through the building envelope of buildings and structures for various purposes. Method of measurements by the combined thermal imaging and thermometric method. ITTF NANU, 2011.
4. Basok, B. I., Davydenko, B. V., Honcharuk, S. M., Novitska, M. P. (2013). Doslidzhennia teplovtrat cherez zovnishniu stinovu konstruktsiiu z dodatkovym sharom uteplennia [Study of heat loss through an external wall structure with an additional layer of insulation].
5. Goncharuk S.M. Experimental determination of heat losses from the surfaces of the building envelope of an administrative building. Industrial heat engineering. 2011. T. 33, № 8. pp. 175-180.
6. Study of the influence of service life on the thermal and physical properties of different types of thermal insulation of wall enclosing structures. Technologies and Engineering, No. 1(12), 2023. pp. 18-25.
7. Borys BASOK, Svitlana GONCHARUK, Maryna MOROZ, Hanna VEREMIICHUK. EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT TRANSFER THROUGH HEAT-INSULATED WALL ENCLOSURE STRUCTURES. Journal of New Technologies in Environmental Science, 2023-3-1. pp. 77-82

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025

ВИКОРИСТАННЯ НАДЗВУКОВОГО ЕЖЕКТОРА В ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Надзвукові ежектори є перспективною технологією для підвищення ефективності холодильних та теплових систем. Вони використовують високошвидкісний первинний потік для створення низького тиску у змішувальній камері, що дозволяє всмоктувати вторинний потік без потреби у механічному компресорі. Це забезпечує зменшення енергоспоживання та підвищення екологічності систем охолодження. Основною перевагою надзвукових ежекторів є можливість використання низькопотенційних джерел тепла, таких як відпрацьовані гази, сонячна енергія та промислові теплоносії. Завдяки цьому їхнє застосування стає особливо актуальним у галузях, де важлива енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат та екологічні аспекти. У даній роботі проведено аналіз наукових статей, присвячених дослідженню ефективності та оптимізації конструкції надзвукових ежекторів. Розглянуто вплив ключових параметрів, таких як геометрія змішувальної камери, форма дифузора, початковий тиск та температура робочого середовища. Використання числового моделювання (CFD) дозволяє оцінити вплив цих факторів на продуктивність системи та знайти оптимальні конфігурації для підвищення коефіцієнта захоплення. У дослідженні також розглядається застосування штучних нейронних мереж для прогнозування роботи надзвукових ежекторів, що дозволяє зменшити час обчислень та підвищити точність оптимізаційних розрахунків. Основні висновки даного дослідження підкреслюють, що вдосконалення конструкції, зокрема використання змінної геометрії змішувальної камери та дифузора, дозволяє значно покращити показники продуктивності. Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка адаптивних ежекторних систем, які можуть автоматично змінювати параметри роботи залежно від зовнішніх умов.

Ключові слова: надзвуковий ежектор, охолоджувальні системи, надзвуковий струмень, енергоефективність, CFD-моделювання, холодоагент.

Вступ

Сучасні технології охолодження відіграють ключову роль у промисловості, транспорті, енергетиці та побутових умовах. В умовах глобального підвищення енерговитрат та екологічних обмежень зростає потреба у розробці енергоефективних систем охолодження, які мінімізують споживання електроенергії та скорочують використання традиційних холодильних агентів, що спричиняють парниковий ефект.

Одним із перспективних напрямків у цій галузі є використання надзвукових ежекторів, які дозволяють підвищити ефективність холодильних систем завдяки використанню теплової енергії замість електричної. В основі роботи такого пристрою лежить принцип газодинамічного всмоктування: енергія первинного потоку використовується для створення розрідження, що спричиняє захоплення вторинного потоку без необхідності механічного компресора.

Надзвукові ежектори мають значний потенціал застосування в охолоджувальних системах, зокрема у промислових установках, системах кондиціонування повітря, транспортних холодильниках, авіаційних та космічних системах. Основними перевагами цієї технології є:

- енергоефективність – використання низькопотенційного тепла (відпрацьованих газів, сонячної енергії, тепла промислових процесів).

- низькі експлуатаційні витрати – відсутність потреби в складних механічних компресорах.

- екологічність – зменшення використання холодоагентів та скорочення шкідливих викидів.

Попри всі переваги, надзвукові ежекторні системи ще не отримали широкого впровадження через низку технологічних проблем. Однією з основних є низький коефіцієнт продуктивності (КП) у порівнянні з традиційними парокомпресійними циклами. Це зумовлює необхідність оптимізації конструкції ежектора, зокрема його змішувальної камери, дифузора та первинного сопла.

У цій статті розглянуто сучасні дослідження у сфері надзвукових ежекторів, їхню ефективність у різних умовах роботи та можливості підвищення коефіцієнта захоплення. Виконано детальний огляд наукових матеріалів, які аналізують вплив конструктивних параметрів ежекторів на їхню продуктивність. Основна увага приділена методам оптимізації, включаючи CFD-моделювання та експериментальні дослідження.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є узагальнення результатів сучасних досліджень щодо використання надзвукових ежекторів у системах охолодження та оцінка перспектив їхнього впровадження в промисловість.

Основні завдання дослідження:

- аналіз принципу роботи надзвукових ежекторів та їхнього впливу на ефективність холодильних систем.
- дослідження сучасних методів оптимізації конструкції ежекторів, включаючи CFD-моделювання.
- огляд практичних застосувань надзвукових ежекторів у транспортних, промислових та комерційних системах охолодження.
- визначення перспективних напрямків подальших досліджень та можливостей покращення конструкції.

Очікується, що результати дослідження сприятимуть подальшому вдосконаленню та впровадженню цієї технології в реальні охолоджувальні установки, що дозволить значно підвищити їхню енергоефективність.

Матеріал і результати досліджень

Надзвуковий ежектор є пристроєм, який використовує високошвидкісний потік робочого середовища для створення області низького тиску та змішування з вторинним потоком. Його конструкція базується на газодинамічних процесах, що дозволяють підвищити ефективність систем охолодження без застосування механічних компресорів.

Надзвуковий ежектор складається з кількох ключових компонентів:

- первинне сопло (забезпечує прискорення робочого середовища до надзвукових швидкостей);
- камера змішування (місце, де відбувається змішування первинного (високошвидкісного) потоку з вторинним (низькошвидкісним) потоком);
- дифузор (забезпечує стиснення суміші потоків і підвищення тиску на виході);

Кожен із цих елементів виконує важливу роль у забезпеченні ефективної роботи ежектора та визначає його продуктивність. Принцип дії надзвукового ежектора базується на використанні кінетичної енергії первинного потоку для створення області розрідження, що спричиняє втягування вторинного потоку. Це відбувається за рахунок кількох фізичних механізмів:

1. Ефект затягування вторинного потоку – високошвидкісний первинний потік, виходячи з сопла, створює область низького тиску, що спричиняє всмоктування вторинного потоку з випарника або іншого джерела.

2. Ударні хвилі – при надзвуковій течії у змішувальній камері можуть утворюватися ударні хвилі, які впливають на ефективність змішування.

3. Компресія у дифузорі – після змішування потік сповільнюється у дифузорі, що приводить до підвищення тиску перед входом у конденсатор.

Робота надзвукового ежектора значною мірою залежить від його геометричних параметрів та умов експлуатації. Основні фактори, що впливають на його ефективність:

- діаметр та довжина змішувальної камери – оптимізація цього параметра покращує ефективність змішування;
- форма дифузора (правильний вибір геометрії дозволяє мінімізувати втрати тиску);
- первинний тиск (високий тиск первинного потоку покращує коефіцієнт захоплення);
- температура робочого середовища (впливає на швидкість звуку, що може змінювати ефективність системи);

Оптимізація цих параметрів є ключовим завданням при розробці ефективних систем охолодження на основі надзвукових ежекторів [1-10].

Дослідження [1], де розглядається вивчення впливу ефективності осесиметричного надзвукового ежектору на систему охолодження, показує, що зі збільшенням числа Маха первинного надзвукового потоку ефективність змішування знижується, що характеризується швидкістю поширення товщини зсувного шару (1), де M – число Маха первинного потоку.

$$\delta'_w = 0,085(0,25 + 0,75e^{-M}) \quad (1)$$

Залежність (1) запропонована на підставі чисельного розв'язку математичної задачі формування взаємодії надзвукового і дозвукового потоків. Модель дозволяє обчислювати всі ключові параметри потоку, такі як кількість затягнутого потоку, втрати тиску, ефективність змішування, теплообмін і роботу системи, виключаючи потребу в довільних параметрах. Результати розрахунків підкреслюють ключову проблему зниження ефективності змішування при збільшенні тиску ежектуючого газу і пропонують

перспективні рішення, за рахунок збільшення площі поверхні контакту надзвукових струменів з вторинним потоком, що досягається застосуванням декількох надзвукових сопел.

Запропонована модель дає можливість оптимізації конструкції за допомогою концепцій конструктивного підходу, який використовується в теплотехнічних обмінниках. Серед яких останнім часом пропонуються багатосоплові конструкції ежекторів та оптимізація контактних зон між потоками, що може значно підвищити ефективність надзвукових ежекторів.

Так, в роботі [2] запропоновано, для збільшення залучення вторинного потоку використання послідовно двох надзвукових сопел (рис.1), первинне – це звичайне осисеметричне сопло Лавалю і вторинного кільцевого сопла в камері змішування на деякій відстані від першого.

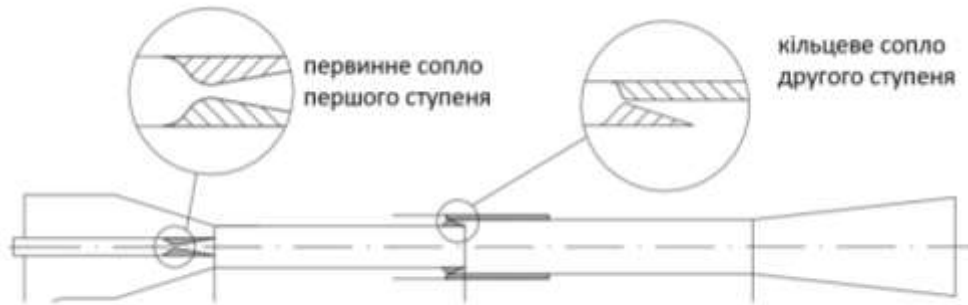


Рисунок 1 - Схема двох послідовних надзвукових сопел

Чисельні дослідження авторів показали взаємозалежність початкового тиску, кута розширення сопла, камери змішування та температури вторинного потоку для отримання оптимального коефіцієнту захоплення. При цьому було показано, що необхідно правильно моделювати теплофізичні властивості холодоагента, оскільки зміна фазового стану пароутворення впливає на розподіл швидкостей в транзвуковій зоні потоку. Так малопотужний прототип системи (5кВт) продемонстрував суттєву нестабільність потоку через конденсацію пари і відповідний низький коефіцієнт продуктивності. При збільшенні потужності, експериментальні результати майже співпадають з теоретичними, що свідчить про майже миттєве конденсацію пари в надзвуковому струмені, і як результат показує кращі результати продуктивності. У нових дизайнах пристроїв були скореговані геометричні параметри камери змішування і дифузору, що підвищило коефіцієнт продуктивності до значення 0.23, при температурах випарника 5°C і генератора 100°C.

Результати роботи показують перспективність охолоджувальних систем на основі багатосоплових надзвукових ежекторів з парою через їхню низьку вартість і екологічність, але залишається невизначеним вплив співвідношення тисків ежектуючого і ежектуємого газів для підвищення коефіцієнта продуктивності.

Застосування надзвукового ежектора в системах охолодження також аналізується в роботі [3], де на підставі теоретичного аналізу законів збереження, руху, теплопровідного стислого в'язкого газу в одновимірній постановці отримані термодинамічні співвідношення параметрів ежектора охолоджувального циклу. Враховано для оцінки коефіцієнту ефективності системи значення компонентів тертя та змішування. Наведено рівняння для визначення швидкостей первинного (2) і вторинного потоку (3), через відповідні значення ентальпії:

$$U_{p.ne} = \sqrt{2\pi(h_{p.ni} + h_{p.ne.is})}; \quad (2),$$

де $h_{p.ni}$ - питома ентальпія первинного потоку перед входом в сопло; $h_{p.ne.is}$ - питома ентальпія первинного потоку (при ізотропічному процесі).

$$U_{s.ne} = \sqrt{2\pi(h_s + h_{s.ne})}; \quad (3),$$

де h_s - питома ентальпія вторинного потоку на вході в систему; $h_{s.ne}$ - питома ентальпія вторинного потоку на виході з сопла.

Проведений ексерго-економічний аналіз дозволяє оцінити фінансову доцільність застосування системи, включаючи капітальні та експлуатаційні витрати. Використання ежектора в охолоджувальних

системах дає змогу утилізувати відпрацьоване тепло та підвищити ефективність процесу, забезпечуючи баланс між енергоефективністю та фінансовими витратами.

Але запропонована система з дозвуковим ежектором, з відносно великим коефіцієнтом ефективності, але з дуже малою витратою, що не може конкурувати з надзвуковим ежектором в системах де потрібні великі витрати.

Дослідження [4], де оптимізується геометрія змішувальної камери в надзвуковому ежекторі для підвищення коефіцієнту ефективності систем охолодження. Запропоновано вигнуту змішувальну камеру замість традиційної циліндричної. Дослідження проводилось методом числового моделювання (CFD), де розглядалися декілька варіантів профілю змішувальної камери з різним радіусом кривизни при фіксованих параметрах сопла, дифузора та горловини. Параметр оцінки ефективності визначається через коефіцієнт захоплення, (відношення витрати вторинного потоку до витрати первинного). Результати свідчать, що вигнута форма (на рис. 2 представлено схематичне зображення ежектора з вигнутою змішувальною камерою) може значно підвищити цей показник. Наприклад, при температурі котла 170°C коефіцієнт захоплення зростає на 36%, а критичний зворотний тиск знижується порівняно з традиційним дизайном.

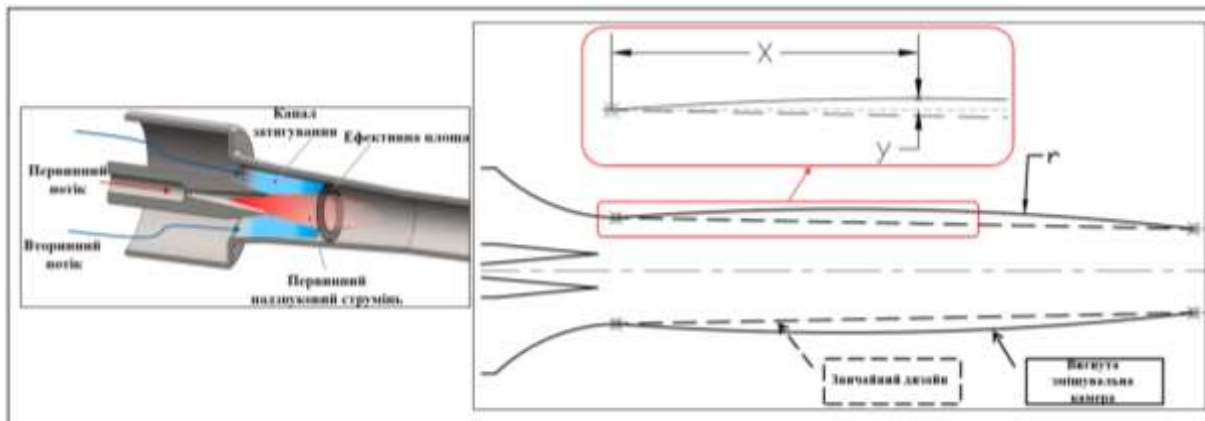


Рисунок 2 - Схематичне зображення ежектора з вигнутою змішувальною камерою

Коефіцієнт захоплення для усіх досліджуваних варіацій ежекторів з вигнутою камерою змішування більший ніж для ежекторів з традиційним дизайном. Для різних робочих температур існує оптимальний радіус кривизни (наприклад, ejector Mix40-3 ($r=1420\text{mm}$) для 130°C та Mix100-3($r=622\text{mm}$) для 170°C), що демонструє важливість точного вибору геометричних параметрів. Підвищення температури котла закономірно зменшує коефіцієнт захоплення, що характерно для надзвукових ежекторів. Детальний аналіз полів течії виявив, що модифікація змішувальної камери впливає на місце утворення ударної хвилі (choking position) у потоці, а зміщення зони стиску вгору за потоком поліпшує змішування первинного і вторинного потоків. Числове моделювання підтвердило, що оптимізація геометрії збільшує ефективну площу потоку і підвищує продуктивність. З економічної точки зору, це відкриває можливість використання нижчих температур джерела тепла і зниження експлуатаційних витрат. Загалом робота А. Muzaber та інших підкреслює важливість залежності форми камери змішування від параметрів первинного надзвукового потоку. Але жодного посилення на експериментальні роботи немає, а чисельні значення чисел Маха (майже 7) для досліджуваного діапазону тиску і температур дуже сумнівні.

Матеріал роботи [5] показує важливість і перспективність дослідження використання ежектора для покращення роботи абсорбційної охолоджувальної системи (RACS) Robur®.

Основною метою дослідження є підвищення коефіцієнта продуктивності (КП) шляхом інтеграції парового ежектора між генератором і конденсатором холодильної установки, схема холодильної системи після додавання ежектора представлена на рис. 3.

Запропоновано моделювання системи охолодження на основі балансу маси та енергії, з урахуванням теплообміну і випарювання, для стислого політропного газу. Коефіцієнт ефективності системи охолодження визначається:

$$\text{COP} = \frac{Q_l}{Q_g + W_{in}}; \quad (4),$$

де, Q_l – загальна теплова потужність системи; Q_g – теплова потужність випарювання; W_{in} – потужність на вході в систему (work rate inlet).

Аналіз моделі ежектора проводиться з урахуванням тисків P_{pf} – первинного, P_{sf} – вторинного потоків, а також P_5 – тиску на виході із ежектора.

Показано, що додавання ежектора дозволило підвищити КП на 70.6% у порівнянні зі стандартною конфігурацією без ежектора (рис.4) і знизити коефіцієнт циркуляції (CR) на 41%, також показано вплив залежності коефіцієнту ефективності системи від температури навколишнього середовища, де T_g – температура генератора, T_{amb} – температура навколишнього середовища, COP – коефіцієнт продуктивності.

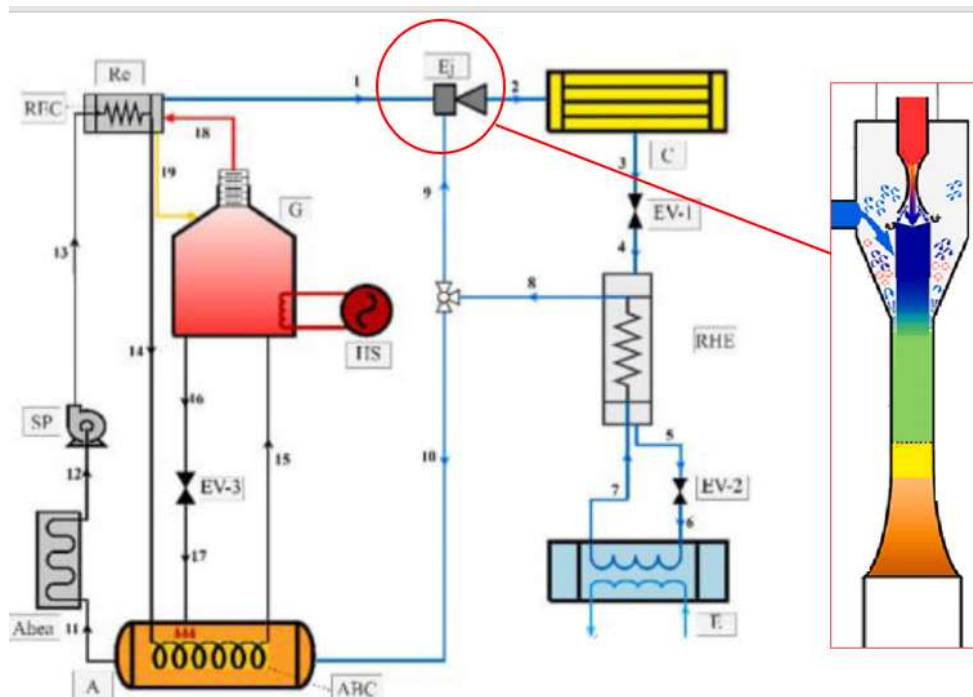


Рисунок 3 - Схема абсорбційної системи охолодження Robur® після додавання ежектора:
 REC – нагрівач; SP – насос; Re – випрямляч; Ev- розширювальний клапан; C- конденсатор;
 IIS – зовнішнє джерело тепла; G – генератор; E – випарник; Ahea – теплообмінник абсорбер-повітря;
 A – абсорбер; ABC – нагрівач змійовик; RHE – центральний теплообмінник хладагента;
 Ej - ежектор

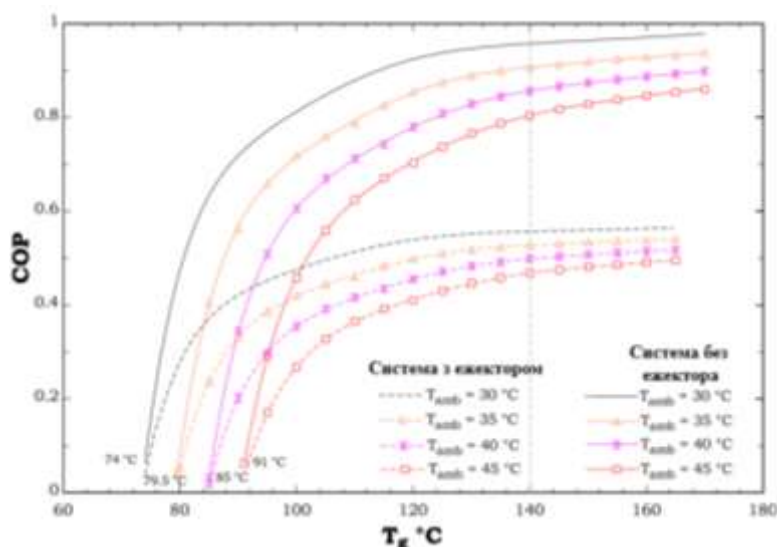


Рисунок 4 - Графік залежності коефіцієнту ефективності системи від температури навколишнього середовища

Впровадження ежектору демонструє значне підвищення продуктивності саме між генератором і конденсатором, де високотемпературний і високий тиск парового потоку захоплює низькотемпературний потік, утворюючи змішаний потік середнього тиску. У роботі деталізовано механізм роботи ежектора,

включаючи формування ударної хвилі в змішувальній трубі, де тиск і температура різко зростають, а далі потік переходить у субзвуковий режим. Виявлено, що вплив зменшення діаметра горловини і збільшення діаметра змішувальної камери підвищують продуктивність, проте лише в межах умов, коли ежектор працює в критичному режимі.

Аналіз роботи [6], спираючись на CFD та експеримент, показує вплив геометрії сопла та його розташування на продуктивність осисеметричного надзвукового ежектора. Виявлено, що відповідне змішування виходу надзвукового сопла у камеру змішування може призводити до рециркуляції всередині змішувальної камери і зменшенні витрати вторинного потоку. На рис. 5 демонструється відповідна рециркуляційна зона. Формування зон рециркуляції залежить від багатьох параметрів, таких як кут сходження зони змішування, первинного та вторинного тиску, а також як було зазначено вище, від розташування вихідного отвору сопла.

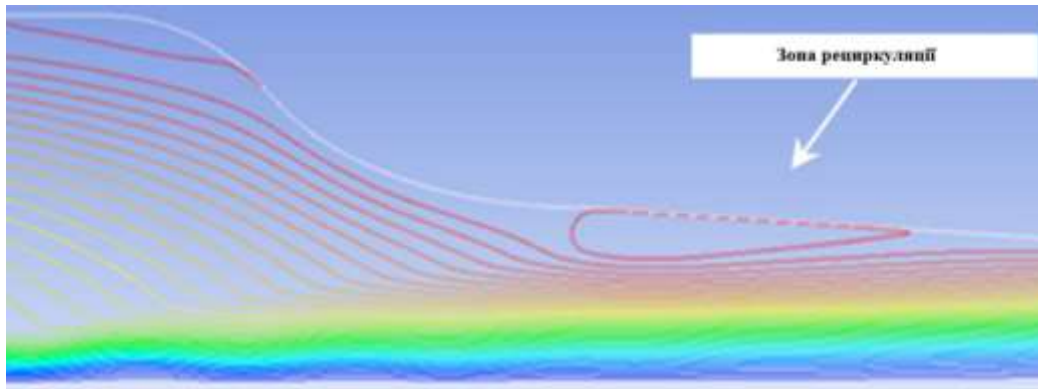


Рисунок 5 - Формування області рециркуляції в камері змішування

Відношення діаметру камери змішування до діаметру сопла при відповідному відношенні тисків первинного і другого потоків визначають інтенсивність змішування і коефіцієнт витрат. Результати проведеного моделювання збігається з експериментом, підтверджуючи, що оптимальне налаштування параметрів мінімізує утворення рециркуляції та підвищує коефіцієнт захоплення.

У роботі [7] аналізується робота надзвукового ежектора з реальними газами (R141b і R245fa) в системі охолодження. Модель була апробована на геометріях та операційних умовах, що відповідають експериментальним дослідженням, і результати моделювання добре співвідносяться з експериментальними даними, з максимальною різницею $\sim 10\%$ за всіма розглянутими умовами.

Після валідації CFD-моделі було проведено дослідження продуктивності експериментального ежектора CETC-A при різних операційних умовах. Схематичне зображення надзвукового ежектора представлено на рис.6, геометричні характеристики наведені в табл. 1. При вивченні впливу трьох геометричних параметрів на ефективність ежектора: положення виходу сопла, довжина змішувальної камери та діаметр входу вторинного потоку, в широкому діапазоні операційних умов показано що всі ці три параметри мають невеликий вплив на продуктивність ежектора.

З трьох геометричних параметрів найбільший вплив на коефіцієнт захоплення має положення виходу сопла, однак варіація коефіцієнта захоплення не перевищує 4% , що має порядок похибки. Також відмічається залежність критичного тиску в конденсаторі від довжини змішувальної камери (L_3), однак і цей вплив невеликий, з варіацією між мінімальними і максимальними значеннями, що становить лише 5% .

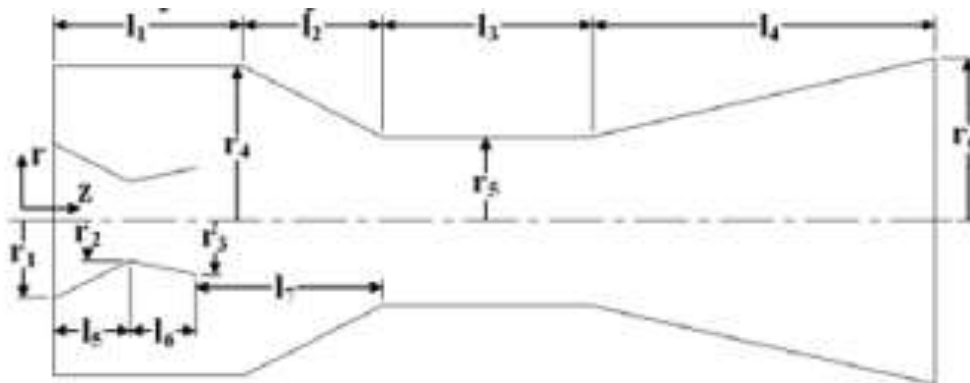


Рисунок 6 - Схематичне зображення надзвукового ежектора

Таблиця 1

Довжина (l), мм							Радіус (r), мм					
l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆
40	32.24	35.36	56.94	18.32	18.32	35.6	6.65	1.32	2.25	11.55	3.49	7.04

У роботі [8] також досліджується вплив використання надзвукових ежекторів у холодильних установках (зокрема, для кондиціонування повітря), а також можливості оптимізації умов роботи ежектора для підвищення ефективності охолоджувальної системи в цілому. Моделювання виконувалась за допомогою ANSYS Fluent 14.5, методом RANS та із застосуванням моделі турбулентності SST k- ω . У роботі порівнюються результати моделювання з використанням холодоагенту R134a (із реальними термодинамічними властивостями з NIST-REFPROP) та результати моделювання ідеального газу.

При моделюванні ідеального газу коефіцієнт захоплення і коефіцієнт продуктивності становлять 0,302 та 0,272 відповідно. При моделюванні системи з використанням властивостей реального холодоагенту R134a коефіцієнт захоплення і коефіцієнт продуктивності становлять 0,264 та 0,238 відповідно. Порівняння засвідчило, що врахування реальних властивостей робочого середовища дає більш точне передбачення коефіцієнта захоплення та коефіцієнта продуктивності, ніж модель ідеального газу, різниця між отриманими кінцевими показниками продуктивності становить ~ 12 %.

Додатково у даному дослідженні автори акцентують увагу, що для підвищення системи охолодження в цілому, важливо правильно підбирати геометричні параметри ежектора, щоб отримати розрахункове надзвукове сопло для відповідних значень тиску і температури випарника і конденсатора. Так, під час моделювання були визначені геометричні параметри ежектора, (табл. 2) які працюють у майже оптимальному режимі при заданих температурах (температура випарника - 10°C; температура конденсатора: ~ 40°C; температура генератора - 95°C).

Таблиця 2

Вхідний діаметр сопла	10 мм
Вихідний діаметр сопла	3.65 мм
Кут сходження сопла	60°
Кут розходження сопла	10°
Відстань від сопла до камери змішування	5 мм
Діаметр камери змішування	5.1 мм
Довжина камери змішування	39 мм
Вихідний діаметр дифузору	13.84 мм
Довжина дифузору	50 мм
Кут дифузору	5°
Загальна довжина ежектора	108.24 мм
Відношення довжини камери змішування до діаметра	7.6

Остаточне підтвердження результатів отриманих в роботі [8] потребує експериментів, але загалом можна сказати, що для дослідження впливу геометрії надзвукового ежектора на його продуктивність доцільно і допустимо використовувати ідеальний газ під час моделювання, але для отримання реальних значень коефіцієнтів продуктивності реальної охолоджувальної системи необхідно застосовувати реальні властивості холодоагентів.

Подальші результати роботи [9] висвітлюють числове моделювання характеристик потоку всередині надзвукового парового ежектора, зокрема оптимальну конструкцію сопел. Досліджується три форми сопел: пряме, опукле (convex) та увігнуте (concave). На рис. 7 показано розподіл чисел Маха для різних конструкцій сопел.

Опукле демонструє найбільший коефіцієнт захоплення (~0.4), однак збільшує турбулентність і втрати через ударні хвилі. Увігнуте забезпечує стабільніший потік і краще відновлення тиску, а пряме залишається збалансованим компромісом. Це черговий раз підкреслює важливість правильного підбору геометричних характеристик надзвукового ежектора при застосуванні його в охолоджувальних системах. Це дослідження відкриває додаткові можливості для підвищення енергоефективності охолоджувальних та абсорбційних систем, що працюють на надзвукових ежекторах, шляхом застосування різних форм сопел, для досягнення оптимальних параметрів геометрії надзвукових ежекторів.

Насамкінець, методичні підходи у роботі [10] пропонують нову модель для швидкого прогнозування роботи надзвукових ежекторів на основі штучних нейронних мереж з алгоритмом зворотного поширення помилки, доповненим оптимізацією рою частинок. Мета — частково замінити дорогі CFD-розрахунки, визначаючи коефіцієнт захоплення, розподіл тиску та швидкість потоку. Мережу навчають на результатах числового моделювання та експериментальних даних, що скорочує

обчислювальні витрати при високій точності. Середня похибка не перевищує 4%, порівняно з моделюванням. Розроблений метод оцінювали на різних робочих середовищах, включно з фреонами та водою, що підтвердило його універсальність. Застосування нейронних мереж дозволяє швидко знаходити оптимальні параметри, підвищуючи енергоефективність і забезпечуючи гнучке керування у реальному часі.

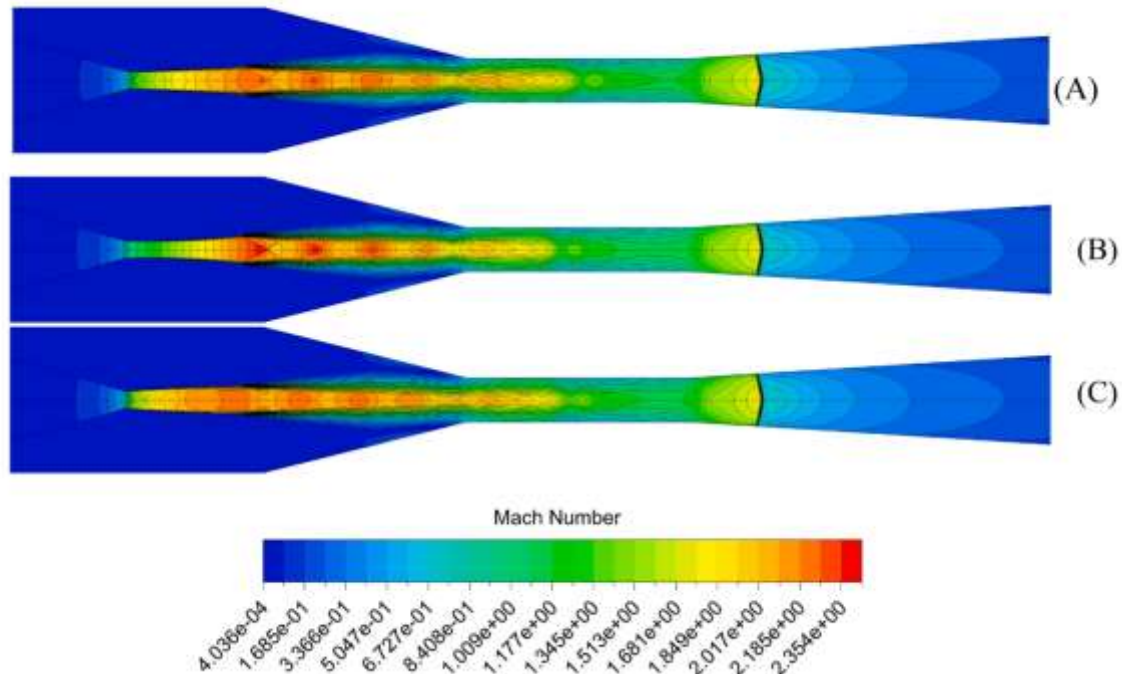


Рисунок 7 - Розподіл чисел Маха для: А – прямого сопла, В – вигнутого сопла, С – увігнутого сопла.

Впровадження такого підходу у проектуванні холодильних системи з надзвуковими ежекторами суттєво зменшує часові та фінансові витрати на проектування, що в свою прискорює розвиток подібних систем охолодження.

Підвищення ефективності надзвукових ежекторів є однією з головних задач у їхньому розвитку та застосуванні в системах охолодження. Важливими факторами, що впливають на продуктивність ежектора, є геометричні параметри, умови експлуатації та оптимізаційні методи, що використовуються для покращення його характеристик.

Різні дослідження [1-9] демонструють, що правильний підбір конструктивних елементів ежектора дозволяє значно підвищити його ефективність. Основні напрямки оптимізації включають: змінну геометрію сопла (можливість адаптації розміру первинного сопла дозволяє регулювати швидкість і тиск потоку, що покращує коефіцієнт захоплення вторинного потоку), оптимізацію форми змішувальної камери (згідно з дослідженнями [4], [9], використання вигнутої камери покращує ефективність змішування потоків і підвищує загальний коефіцієнт продуктивності), покращення форма дифузора (подовжені та плавні дифузори знижують втрати тиску, що збільшує ефективність компресії вихідного потоку).

Продуктивність надзвукового ежектора залежить не лише від його конструкції, але й від зовнішніх умов, у яких він експлуатується. Ключові фактори, що впливають на ефективність роботи:

- температура первинного потоку (підвищення температури первинного потоку може суттєво збільшити коефіцієнт захоплення);
- тиск вторинного потоку (стабільний низький тиск у вторинному контурі забезпечує кращі умови для всмоктування потоку в змішувальну камеру);
- вплив навколишнього середовища (зміни атмосферного тиску та температури впливають на ефективність роботи ежекторів, особливо в мобільних застосуваннях, таких як транспортні охолоджувальні системи).

Окрім CFD-моделювання, у сучасних дослідженнях застосовуються методи машинного навчання для оптимізації параметрів ежекторів [10]. Використання штучних нейронних мереж та алгоритмів рою частинок дозволяє знаходити найкращі комбінації конструктивних параметрів та прогнозувати продуктивність системи в режимі реального часу.

Оптимізація конструкції надзвукових ежекторів є ключовим напрямком для підвищення ефективності систем охолодження.

Застосування надзвукових ежекторів у різних сферах промисловості та енергетики відкриває нові можливості для підвищення ефективності та зменшення енергетичних витрат [1-10]. Завдяки здатності працювати без механічних компресорів та використовувати низькопотенційну теплову енергію, ці пристрої знаходять своє місце в різних галузях. Надзвукові ежектори є універсальними пристроями, які можуть бути інтегровані у широкий спектр енергетичних та охолоджувальних технологій. Їх впровадження сприяє зниженню енергетичних витрат, покращенню екологічних характеристик та підвищенню загальної ефективності теплових систем. Подальший розвиток технології дозволить розширити сфери їх застосування та адаптувати до специфічних умов роботи.

Висновки

На основі аналізу останніх наукових статей можна зробити висновок, що використання надзвукових ежекторів у системах охолодження є перспективним напрямком для підвищення ефективності та зниження енергетичних витрат. Результати досліджень підтверджують, що оптимізація конструкції ежектора дозволяє покращити його продуктивність.

Ефективність надзвукових ежекторів значною мірою залежить від їхньої конструкції. Оптимізація параметрів змішувальної камери, форми дифузора та первинного сопла дозволяє підвищити коефіцієнт захоплення та продуктивність системи.

Використання числового моделювання (CFD) є ключовим підходом до вдосконалення конструкції. CFD-дослідження показали, що правильно спроєктований дифузор і змішувальна камера можуть суттєво покращити енергоефективність ежекторних холодильних систем. Експериментальні дослідження підтверджують високу кореляцію між числовими моделями та реальними результатами. Оптимізація геометрії та правильний вибір параметрів роботи дозволяють досягати високого рівня продуктивності та стабільності системи.

Впровадження інтелектуальних алгоритмів управління та оптимізації (штучні нейронні мережі, алгоритми рою частинок) може значно знизити час на пошук оптимальних параметрів надзвукових ежекторів.

Перспективи подальших досліджень включають розробку змінної геометрії надзвукових ежекторів, інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії та створення автоматизованих адаптивних систем.

Список використаної літератури

1. Grazzini G., Mazzelli F., Milazzo A. CONSTRUCTAL DESIGN OF THE MIXING ZONE INSIDE A SUPERSONIC EJECTOR, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY Volume 34 (2016), Special Issue 1, c. S109-S118 <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.34S114>
2. Milazzo A., Rocchetti A., Eames I. Theoretical and experimental activity on Ejector Refrigeration, Energy Convers. Manag. 45 (1245-1254) (2014), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.130>
3. Golafshani S.R., Houshfa E. Integrated ejector cooling, PVT, and MGT system for smart building applications: An exergy and technoeconomic optimization, Energy Convers. Manag. 66 (105752) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105752>
4. Muzaber A., Bassmaji N., Kaddah A. A new mixing chamber geometry design for supersonic ejector performance optimization using computational fluid dynamics, Energy Convers. Manag. 25 (101047) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101047>
5. Mukhtar H.K., Ghani S. Improving the performance of a commercial absorption cooling system by using ejector: A theoretical study, Energy Convers. Manag. 45 (102967) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102967>
6. Zohbi B.E., Bukharin N., Assoum H.H. Investigation of the effects of the jet nozzle geometry and location on the performance of supersonic fluid ejectors, Energy Convers. Manag. 8 (228-233) (2022), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2022.01.029>
7. D. Scott., Z. Aidoun., O. Bellache., M. Ouzzane., "CFD Simulations of a Supersonic Ejector for Use in Refrigeration Applications" (2008). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 927. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/927>
8. Honra J., Berana M., Danao L. CFD Analysis of Supersonic Ejector in Ejector Refrigeration System for Air Conditioning Application, Proceedings of the World Congress on Engineering 2017 Vol II WCE 2017, July 5-7, 2017, London, U.K.
9. Mukhtar H.K., Ghani S., Fadlalla A. Numerical investigation of the flow characteristics inside a supersonic vapor ejector, Energy Convers. Manag. 24 (100912) (2024), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100912>
10. Zhu H., Liu J., Yu J., Yang P. Artificial neural network-based predictive model for supersonic ejector in refrigeration system, Energy Convers. Manag. 49 (103313) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103313>

USE OF SUPERSONIC EJECTOR IN COOLING SYSTEMS

Supersonic ejectors are a promising technology for improving the efficiency of refrigeration and heating systems. They use a high-speed primary stream to create a low pressure in the mixing chamber, which allows the secondary stream to be sucked in without the need for a mechanical compressor. This reduces energy consumption and increases the environmental friendliness of cooling systems. The main advantage of supersonic ejectors is the ability to use low-potential heat sources, such as exhaust gases, solar energy, and industrial coolants. This makes their use especially relevant in industries where energy efficiency, reduced operating costs, and environmental aspects are important. This paper analyzes scientific articles on the efficiency and design optimization of supersonic ejectors. The influence of key parameters such as mixing chamber geometry, diffuser shape, initial pressure, and working medium temperature is considered. The use of numerical modeling (CFD) allows us to evaluate the impact of these factors on system performance and find optimal configurations to increase the capture rate. The study also considers the use of artificial neural networks to predict the operation of supersonic ejectors, which reduces computation time and increases the accuracy of optimization calculations. The main conclusions of this study emphasize that design improvements, such as the use of variable geometry of the mixing chamber and diffuser, can significantly improve performance. A promising area for further research is the development of adaptive ejector systems that can automatically change the operating parameters depending on external conditions.

Keywords: supersonic ejector, cooling systems, supersonic jet, energy efficiency, CFD modeling, refrigerant

References

1. G. Grazzini, F. Mazzelli, A. Milazzo, CONSTRUCTAL DESIGN OF THE MIXING ZONE INSIDE A SUPERSONIC EJECTOR, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY Volume 34 (2016), Special Issue 1, c. S109-S118 <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.34S114>
2. A. Milazzo, A. Rocchetti, I. Eames, Theoretical and experimental activity on Ejector Refrigeration, Energy Convers. Manag. 45 (1245-1254) (2014), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.130>
3. S.R. Golafshani, E. Houshfa, Integrated ejector cooling, PVT, and MGT system for smart building applications: An exergy and technoeconomic optimization, Energy Convers. Manag. 66 (105752) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105752>
4. A. Muzaber, N. Bassmaji, A. Kaddah, A new mixing chamber geometry design for supersonic ejector performance optimization using computational fluid dynamics, Energy Convers. Manag. 25 (101047) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101047>
5. H.K. Mukhtar, S. Ghani, Improving the performance of a commercial absorption cooling system by using ejector: A theoretical study, Energy Convers. Manag. 45 (102967) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102967>
6. B.E. Zohbi, N. Bukharin, H.H. Assoum, Investigation of the effects of the jet nozzle geometry and location on the performance of supersonic fluid ejectors, Energy Convers. Manag. 8 (228-233) (2022), <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.029>
7. Scott, David; Aidoun, Zine; Bellache, Omar; and Ouzzane, Mohamed, "CFD Simulations of a Supersonic Ejector for Use in Refrigeration Applications" (2008). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 927. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/927>
8. J. Honra, M. Berana, L. Danao, CFD Analysis of Supersonic Ejector in Ejector Refrigeration System for Air Conditioning Application, Proceedings of the World Congress on Engineering 2017 Vol II WCE 2017, July 5-7, 2017, London, U.K.
9. H.K. Mukhtar, S. Ghani, A. Fadlalla, Numerical investigation of the flow characteristics inside a supersonic vapor ejector, Energy Convers. Manag. 24 (100912) (2024), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100912>
10. H. Zhu, J. Liu, J. Yu, P. Yang, Artificial neural network-based predictive model for supersonic ejector in refrigeration system, Energy Convers. Manag. 49 (103313) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103313>

Надійшла: 03.03.2025

Received: 03.03.2025

ЕКОНОМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНИХ ЗАХОДІВ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Моделюється режим роботи регульованої конденсаторної установки (КУ) напругою 0,4 кВ з метою дослідження економічної ефективності її роботи в електричній мережі живлення споживачів електроенергії. Проаналізовані добові графіки активного і реактивного навантаження трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ і живлячої мережі, досліджено режими роботи КУ та визначені показники економічної ефективності компенсації реактивної потужності на розглянутому прикладі електричної мережі. Згідно чинних нормативних документів, реактивні перетікання певної величини з мереж постачальних організацій в мережі споживачів потребують їх оплати або застосування засобів компенсації цих перетоків. Окрім цього, реактивні перетікання обмежують пропускну здатність електричних мереж живлення. З метою підвищення економічності електроспоживання та пропускну здатності електричних мереж живлення пропонується алгоритм роботи КУ та оцінки економічної ефективності її роботи.

Ключові слова: реактивні перетікання, втрати електроенергії, компенсація реактивної потужності, дисконтований дохід, конденсаторні батареї, пропускну здатність.

Актуальність.

Прикладом ефективних практичних дій з енергозбереження є роботи по нормалізації потоків реактивної потужності і її компенсації – це сприятиме зниженню втрат електроенергії в електричних мережах, що еквівалентно спорудженню додаткових генеруючих потужностей, але з меншими затратами.

Питання компенсації реактивної потужності розглядається авторами багатьох публікацій [3, 4, 5], але сучасні умови роботи електричних мереж та чинні нормативно-технічні вимоги вимагають нових підходів до найефективнішого енергозберігаючого заходу в електричних мережах.

Завдання обґрунтування параметрів і розміщення КУ в електричних мережах розділяється на дві складові: підтримка балансу реактивної потужності в електричній системі (ЕС) і зниження втрат потужності і електроенергії в розподільних мережах та мережах споживачів. Недостатня компенсація реактивної потужності – це збільшення втрат потужності в електричних мережах і зменшенню їх пропускну спроможності.

Однією з причин загострення такої ситуації є зміни в характері навантаження електроспоживання: це технологічне устаткування на напівпровідниковій базі, збільшення долі освітлювального навантаження з одночасним зменшенням долі ламп розжарювання, збільшення долі нелінійного навантаження, в тому числі, побутового привели до значного завантаження розподільних електричних мереж реактивною потужністю. А це в свою чергу, не дозволяє пропускати по них активну потужність, на яку ці лінії були розраховані.

Аналіз системних аварій у світовій енергетиці показує їх зв'язок з розвитком лавини напруги – прогресуючим зниженням напруги по усій мережі, викликаним дефіцитом реактивної потужності. Тому забезпечення запасів реактивної потужності потрібне не лише для підвищення економічності функціонування мереж, але і для забезпечення надійності електричних систем.

Окрім цього, зростає імовірність аварійного відключення споживачів через перевантаження ліній електропередачі і трансформаторів підстанцій, в тому числі і необґрунтованими потоками реактивної потужності.

Метою дослідження є:

- обґрунтування алгоритму роботи регульованих КУ;
- визначення впливу компенсації реактивної потужності на оплату за реактивні перетікання з мереж електропостачальних організацій;
- визначення впливу компенсації реактивної потужності на пропускну спроможність електричних мереж.

Матеріали і методи дослідження.

В проведеному дослідженні вибір місця встановлення і потужності регульованої КУ обумовлений значною потужністю, в першу чергу, реактивного навантаження даної трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ закритого типу (ЗТП) і, відповідно, технічною можливістю розміщення КУ в приміщенні цієї ЗТП – цього достатньо для досягнення мети дослідження. Для схеми мережі, де від електричної системи по лінії 10 кВ живиться ЗТП 10/0,4 кВ (рис.1), змодельовано режими роботи КУ, підключеної до шин 0,4 кВ цієї ЗТП та їх оцінку.

На ЗТП встановлено силовий трансформатор типу ТМ-630 з активним опором обмоток $R_t=1,915$ Ом, розрахунковий період – місяць -740 години, опір системи $r_c=2,2$ Ом, опір лінії 10 кВ, довжиною 1800 м, виконаної кабелем ААШВ 3х120 $R_{л}=0,547$ Ом. Вартість 1 кВт·год електроенергії в мережі $\Pi=4,3$ грн/кВт·год. Сумарний опір розподільної мережі, приведений до базової напруги 10 кВ складає 4,662 Ом.

Щомісячне споживання споживачем активної і реактивної енергії складає $W_{P_{mic}}=3,155 \cdot 10^5$ кВт·год, $W_{Q_{mic}}=2,593 \cdot 10^5$ кВАр·год. Очікувані щомісячні втрати електроенергії в розглядуваній мережі $\Delta W_{mic}=1,101 \cdot 10^4$ кВт·год.

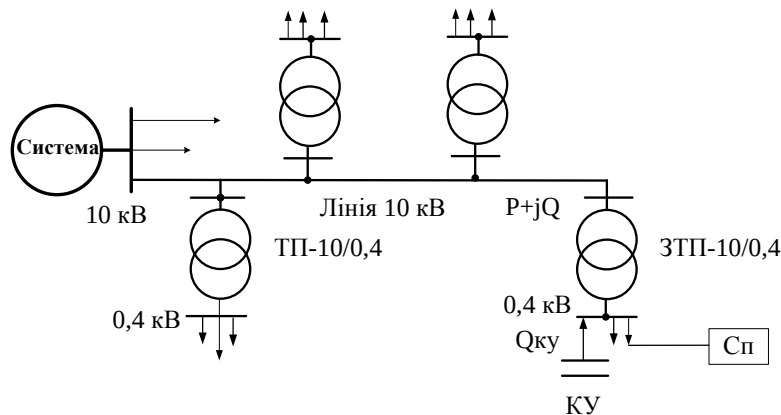


Рисунок 1 - Пояснювальна схема електричної мережі до моделювання роботи КУ.

Фактичні величини розрахункового активного P , реактивного Q і повного S навантаження на шинах 0,4 кВ підстанцій 10/0,4 кВ: $P_p=570$ кВт, $Q=457,3$ кВАр, $S=730,7$ кВА, $\cos\varphi=0,78$.

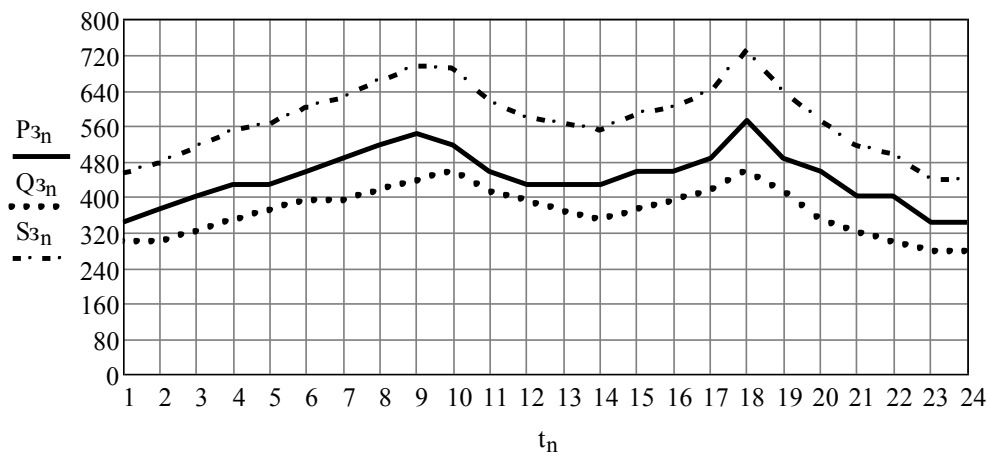


Рисунок 2 - Добові графіки активного P , реактивного Q та повного S навантаження ЗТП 10/0,4 кВ (як приклад – для зимового періоду).

Оплата за споживання і генерацію реактивної електроенергії в точці обліку визначається трьома складовими [1]:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3, \quad (1)$$

де Π_1 – основна оплата за перетікання реактивної електроенергії, грн:

$$\Pi_1 = (W_{Q_{mic}} + W_{Q_r}) \cdot D \cdot \Pi, \quad (2)$$

де D - економічний еквівалент реактивної потужності [1], в наведеному прикладі прийнято 0,04 кВт/кВ·Ар;

Ц – прогнозована ціна закупівлі електроенергії на ринках, що визначається на рівні прогнозованої оптової ринкової ціни на електроенергію, яка затверджена НКРЕКП на квартал, що передував даті початку дії нового ринку електроенергії, грн/кВт·год;

П2 – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності (КРП), грн:

$$П2 = П1 \cdot (\operatorname{tg} \varphi - 0,25)^2, \quad (3)$$

Фактичний тангенс навантаження об'єкта споживача визначається за формулою $\operatorname{tg} \varphi = WQ_{\text{міс}} / WP_{\text{міс}}$.

П3 – знижка плати при залученні споживача до регулювання балансу реактивної потужності (електроенергії), грн. Оскільки наш споживач не приймає участі в генерації реактивної потужності $WQ_r = 0$, то цю складову в дослідженні не враховуємо.

Оплата за реактивні перетікання з мережі постачальної організації складають: $П1 = 44\,600$ грн, $П2 = 25\,503,2$ грн, $П = 70\,100,97$ грн.

Досліджується робота КУ типу УКРМ 0.4-450-10-451У3, потужністю 450 кВ·Ар (10 ступенів по 45 кВ·Ар) вартістю $K = 150\,000$ грн.

Режим включення КУ в залежності від реактивного навантаження на шинах 0,4 кВ ЗТП моделюється функцією (для зимового графіку навантаження):

$$N_{3n} := \operatorname{if} \left(\frac{Q_{3n}}{P_{3n}} < Z, \operatorname{floor} \left(\frac{Q_{3n}}{q1} \right), \operatorname{ceil} \left(\frac{Q_{3n}}{q1} \right) \right) \quad (4)$$

де N – кількість увімкнених ступенів конденсаторної установки в певну годину доби, шт;

P_3 , Q_3 – погодинні активне (кВт) та реактивне (кВ·Ар) навантаження добового графіку;

$q1$ – потужність однієї ступені регульованої КУ, кВ·Ар;

Z – кількість ступенів регулювання КУ.

Результати досліджень та їх обговорення.

Змодельовавши режим роботи регульованої конденсаторної установки, отримали графіки реактивних навантажень і ввімкненої потужності КУ (рис.3) та графіки реактивних перетікань з мережі живлення до її компенсації і після її компенсації (рис.4).

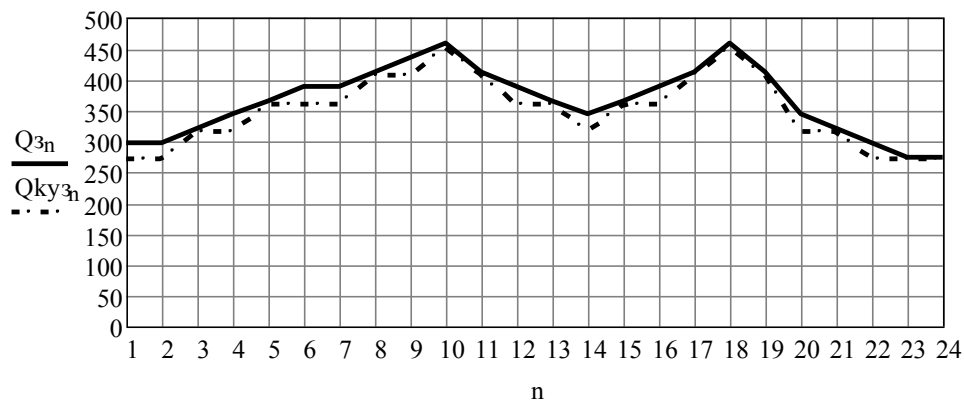


Рисунок 3 - Графіки реактивних навантажень Q_3 (суцільна лінія) і ввімкненої потужності КУ $Q_{ку}$ (штрих-пунктирна лінія) для зимового періоду.

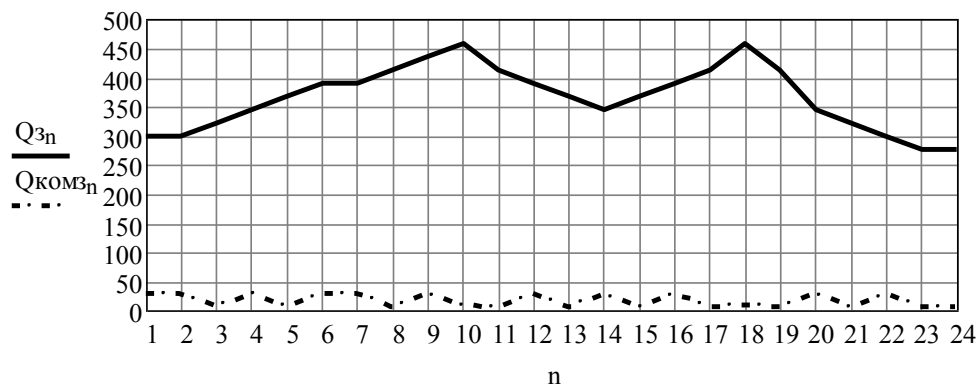


Рисунок 4 - Графіки споживання реактивної потужності з мережі живлення до її компенсації (суцільна лінія) і після її компенсації (штрих-пунктирна лінія) для зимового періоду.

Сумарна середньомісячна величина заощадженої електроенергії за рахунок зниження втрат при компенсації реактивної потужності складає $\delta W_{\text{міс}}=4443$ кВт·год. Вартість заощадженої за місяць електроенергії складає $C_w=19\,110$ грн.

Розрахунок оплати за реактивні перетікання після їх компенсації показав наступні результати: $\Pi_1=1873$ грн, $\Pi_2=0$, $\Pi_3=1873$ грн.

Отже, зниження щомісячної плати за реактивні перетікання при їх компенсації складає:

$$\Delta\P=\Pi-\Pi_k=70100,97-1873=68230\text{ грн.}$$

Економічну ефективність компенсації реактивної потужності на шинах 0,4 кВ ЗТП-10/0,4 наглядно ілюструє щомісячний m чистий дисконтований дохід (рис.5) [2]:

$$ЧДД_m := \sum_{m=1}^m \left[\left(C_{\Sigma m} + \Delta\P_m - 3_m - K_m \right) \cdot \frac{1}{(1+e)^m} \right] \quad (5)$$

де C – очікувана вартість щомісячної заощадженої електроенергії внаслідок зменшення її втрат в розподільчій мережі з трансформаторною підстанцією ЗТП-10/0,4 кВ включно, грн;

3_m – амортизаційні, експлуатаційні та кредитні щомісячні відрахування від вартості КУ:

$$3_m=K \cdot E, \quad (6)$$

E – загальний коефіцієнт відрахувань, котрий включає відрахування на амортизацію E_a , експлуатацію E_e та відшкодування кредитних коштів e , в.о.

$$E=E_a+E_e+e, \quad (7)$$

$e=0,15$ – номінальна норма дисконту, прирівняна до вартості кредиту згідно курсу НБУ, в.о;

В дослідженнях прийняті наступні значення цих коефіцієнтів $E_a=0,05$; $E_e=0,07$.

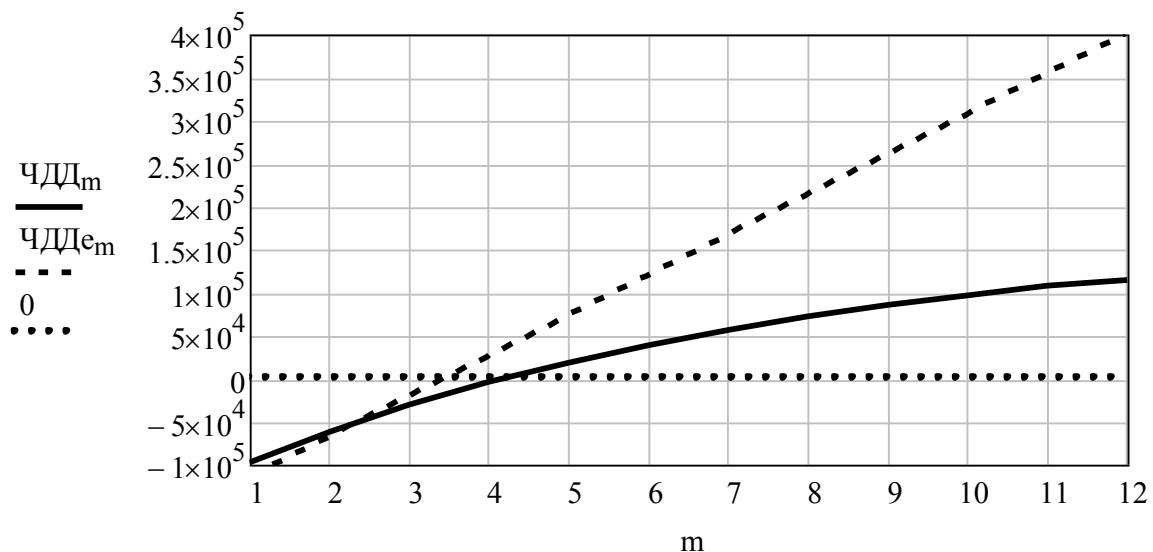


Рисунок 5 - Зміна чистого дисконтованого доходу від компенсації реактивної потужності протягом двох років експлуатації: ЧДД (суцільна лінія) - при придбанні КУ за власні кошти споживача; ЧДД_{кр} (штрих-пунктирна лінія) - при придбанні КУ за запозичені кошти.

Висновки і перспективи.

Окрім зменшення втрати електроенергії в розподільчій мережі та плати споживачем за реактивні перетікання з мережі електропостачальної організації, компенсація реактивної потужності розвантажує електричну мережу живлення ЗТП, зокрема і саму підстанцію (рис.6): як приклад, для зимового періоду зниження повного навантаження підстанції протягом доби складає 20...26% розрахункового навантаження. В цілому це підвищує пропускну здатність електричної мережі, особливо в умовах перевантаження її елементів – кабелів, силових трансформаторів.

При цьому, коефіцієнт потужності добового навантаження зростає від 0,78 до 0,998-1,0.

Отримані результати дослідження показали, що сумарний дисконтований дохід за 1 рік експлуатації досліджуваної КУ складає ЧДД_е=115200 грн - при придбанні КУ за запозичені кошти (з урахуванням $e=0,15$) і ЧДД_с=402700 грн - при придбанні КУ за власні кошти споживача.

Як видно із графіків на рис. 6, чистий дисконтований дохід стає додатнім через 3 місяці експлуатації регульованої конденсаторної установки, якщо вона придбана за запозичені кошти ($e=0,15$). Якщо конденсаторна установка придбана за обігові кошти підприємства ($e=0$), то чистий дисконтований дохід стає додатнім через 5 місяців роботи цієї установки.

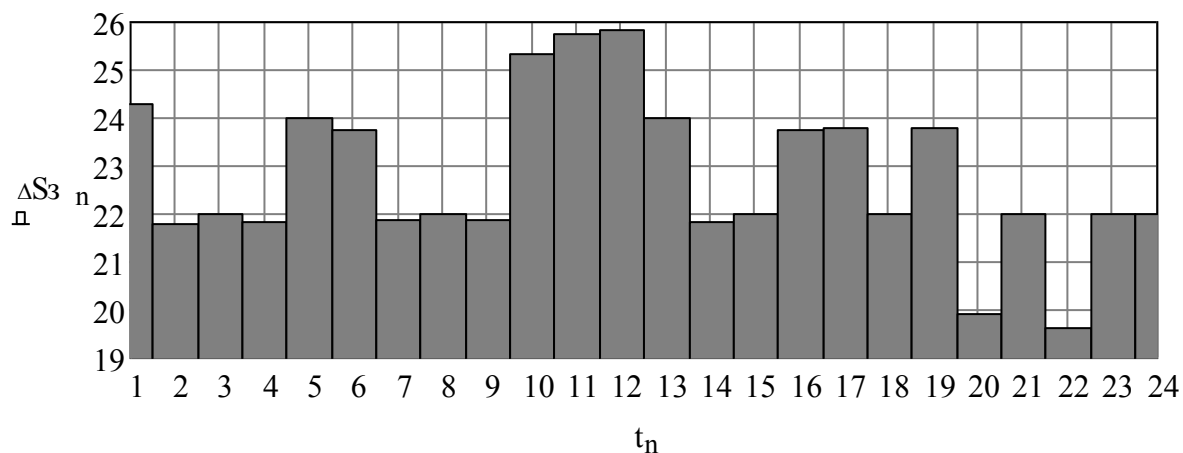


Рисунок 6 - Зниження (%) повного навантаження підстанції внаслідок КРП (як приклад - для зимового періоду).

Чистий дисконтований дохід стає додатнім на 3-му місяці з початку експлуатації конденсаторної установки - при умові придбання КУ за кошти споживача і на 19-му місяці - при умові придбання КУ за запозичені кошти згідно курсу НБУ.

Таким чином, для тимчасового збільшення пропускної здатності підстанції 10/0,4 кВ без її реконструкції доцільно застосувати компенсацію реактивної потужності за допомогою регульованої КУ потужністю 450 кВ·Ар вартістю 150000 грн.

Список використаної літератури

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії / Наказ Міненерго та вугільної промисловості № 87 від 06.02.2018//Офіційний вісник України від 27.04.2018. - № 33. - с. 172.
2. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі: ГКД 340.000.002-97. -К.: Міненерго України, 1997.-54 с.
3. Омельчук А.О. Енергозберігаючі режими в системах електропостачання: Навч. посібник / А.О.Омельчук. - К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. - 257 с.
4. Лежнюк, П. Д. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : монографія / П. Д. Лежнюк, О. М. Нанака. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 148 с.
5. Рогальський Б. С. Обґрунтування переходу плати за споживання реактивної електроенергії на плату за реактивну потужність / Б. С. Рогальський, Л. Н. Добровольська, О. М. Нанака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 42–45.

A. Omelchuk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0009-0007-3964-497X

V. Zakolodyazhnyi¹, assistant, ORCID 0000-0001-8277-4170

M. Lozova², student

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Taras Shevchenko National University of Kyiv

ECONOMIC CYBERNETICS OF ENERGY SAVING MEASURES IN THE ELECTRICAL NETWORKS OF ELECTRICITY CONSUMERS

The mode of operation of a regulated capacitor unit (CU) with a voltage of 0.4 kV is simulated in order to study the economic efficiency of its operation in the electric power supply network of electricity consumers. The daily schedules of active and reactive load of the 10/0.4 kV transformer substation and the supply network were analyzed, the operation modes of the CU were investigated, and the indicators of the economic efficiency of reactive power compensation were determined on the considered example of the electric network. According to current regulatory documents, reactive flows of a certain amount from the networks of supply organizations to the network of consumers require their payment or the use of means of compensation for these flows. In addition, reactive flows limit the bandwidth of electrical power networks. In order to increase the efficiency of electricity consumption and the throughput of electrical power networks, an algorithm for the operation of the CU and an assessment of the economic efficiency of its operation is proposed.

Keywords: reactive flows, power losses, reactive power compensation, discounted income, capacitor banks, bandwidth.

References

1. Metodyka obchyslennya platy za peretikannya reaktyvnoyi elektroenerhiyi [Methodology for calculating the fee for the flow of reactive electricity] / Nakaz Minenerho ta vuhil'noyi promyslovosti № 87 vid 06.02.2018//Ofitsiynny visnyk Ukrayiny 27.04.2018, 33, 172.
2. Vyznachennya ekonomichnoyi efektyvnosti kapital'nykh vkladov v enerhetyku. Metodyka. Enerhosystemy i elektrychni merezhi [Determination of the economic efficiency of capital investments in energy. Method. Energy systems and electrical networks]: HKD 340.000.002-97. -K.: Minenerho Ukrayiny, 1997, 54.
3. Omel'chuk, A.O. (2016) Enerhozberihayuchi rezhymy v systemakh elektropostachannya: Navch. posibnyk [Energy-saving modes in power supply systems: Study. Manual] / A.O. Omelchuk. - K.: CP "COMPRINT", 257.
4. Lezhnyuk, P. D. (2015) Formuvannya umov optimal'nosti kompensatsiyi reaktyvnoyi potuzhnosti v elektrychnykh merezhakh spozhyvachiv i enerhopostachal'nykh kompaniy: monohrafiya [Formation of optimal conditions for compensation of reactive power in electric networks of consumers and energy supply companies]/ P. D. Lezhnyuk, O. M. Nanaka. – Vinnytsya : VNTU, 148.
5. Rohal's'kyi B. S. (2008) Obgruntuvannya perekhodu platy za spozhyvannya reaktyvnoyi elektroenerhiyi na platu za reaktyvnu potuzhnist' [Justification of the transition of the charge for the consumption of reactive electricity to the charge for reactive power]/ B. S. Rohal's'kyi, L. N. Dobrovol's'ka, O. M. Nanaka // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. 3, 42–45.

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025

Т.Ю. Антоненко¹, канд. техн. наук., ORCID 0009-0007-2388-2252
 Р.О. Буйний², канд. техн. наук., доцент, ORCID 0000-0002-5432-2924

А.О. Ворущило³, аспірант

О.В. Гай⁴, канд. техн. наук., доцент, ORCID 0000-0001-5460-7260

І.В. Петренко⁴, інженер, ORCID 0009-0009-0490-3569

О.О. Ткаченко⁵, канд. техн. наук., ORCID 0000-0001-7307-7293

¹ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ»

²Національний університет «Чернігівська політехніка»

³Інститут загальної енергетики НАН України

⁴НЕК «Укренерго»

⁵Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України

ПРО ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕКРАНАХ ОДНОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ

Вибір способу заземлення екранів екструдованих кабелів середньої, високої та надвисокої напруги передбачає виконання відповідного обґрунтування, елементами якого є втрати потужності в струмовідних жилах і екранах кабелів. Встановлено, що існуючі точні методи розрахунку втрат потужності в екранах одножильних кабелів є достатньо складними, а похибка наближених методів розрахунку може сягати до 30%. Запропоновано достатньо простий алгоритм розрахунку втрат потужності у екранах одножильних кабелів, який базується на підходах стандарту ДСТУ ІЕС 60287-1-1:2009 та забезпечує прийнятну точність для інженерних розрахунків під час проєктування та експлуатації КЛ. Алгоритм враховує можливі способи розташування кабелів у траншеї КЛ: у вершинах рівностороннього трикутника впритул та у площині через один зовнішній діаметр кабелю. Він передбачає розрахунок наведених у екранах струмів, які еквівалентні за втратами потужності. Для оцінки величини технологічних витрат електричної енергії у КЛ запропоновано формули, які враховують також складову втрат у екранах кабелів для різних рівнів інформаційного забезпечення та форму графіка електричного навантаження. Наведені формули для розрахунку технологічних витрат електричної енергії справедливі за симетричного навантаження у жилах КЛ.

На підставі запропонованого алгоритму отримані значення коефіцієнтів втрат для одножильних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену середньої, високої та надвисокої напруги з алюмінієвими та мідними жилами усіх типових перерізів, що виробляються заводами-виробниками кабельної продукції. Такі значення дозволять спростити та пришвидшити розрахунки втрат потужності та технологічних витрат електричної енергії у КЛ під час їх проєктування та експлуатації. Пропонується доповнити діючу нормативну документацію запропонованим алгоритмом та таблицями із отриманими значеннями коефіцієнта втрат.

Ключові слова: кабельні лінії, екрани кабелів, втрати потужності, технологічні витрати електричної енергії.

Вступ

Плановані до будівництва об'єкти електричних мереж мають бути технічно можливими та економічно доцільними. Чинні нормативні документи з улаштування кабельних ліній електропередавання (КЛ) середньої, високої та надвисокої напруги [1-2] передбачають для кабелів з екструдованою ізоляцією зі зшитого поліетилену, кожен з яких складається щонайменше з струмовідної жили, ізоляції, екрану та зовнішньої оболонки, такі способи заземлення екранів КЛ:

- 1) з обох кінців;
- 2) з одного кінця;
- 3) з обох кінців із застосуванням їх транспозиції;
- 4) з одного кінця окремих секцій із порушенням неперервності екранів вздовж КЛ;
- 5) комбінацію способів заземлення екранів.

Оскільки [2] передбачає вибір способу улаштування електроустановки на підставі порівняння варіантів, в Україні для вибору найкращого варіанту з N можливих застосовують нормативні документи [3-4], де у якості показника ефективності використовують інтегральний ефект (IE), званий також чистим дисконтованим доходом або NPV (net present value), який обчислюють за формулою [5]:

$$IE_{t,n} = -K_n + \sum_{t=0}^t \frac{R_{t,n} - V_{t,n}}{(1+d)^t}, \quad (1)$$

де K – інвестиції за варіантом n ;

$R_{t,n}$ – вигоди, що досягаються у рік t за варіантом n ;

$V_{t,n}$ – витрати, що здійснюються у рік t за варіантом n ;

d – норма дисконту

t – рік розрахункового періоду.

Найкращий варіант досягає найбільшого IE протягом розрахункового періоду і має, зазвичай, найменший термін окупності.

Спосіб заземлення екранів впливає як на склад і вартість використовуваного обладнання (реалізація способів 2-5 пов'язана з використанням спеціальних муфт і обмежувачів перенапруги нелінійних – ОПН), так і пропускну здатність кабелів КЛ і технологічні витрати електричної енергії (реалізація способу 1 обмежує максимальний струм кабелів через їх додатковий нагрів струмами, що протікають в їх екранах). Це робить розрахунок втрат потужності і енергії важливим елементом обґрунтування вибору способу заземлення екранів кабелів КЛ.

Відповідно до [1-2] заземлення оболонки (екранів) кабелів з обох кінців КЛ використовують у випадках, коли не встановлено спеціальних вимог щодо підвищення пропускну спроможності кабелів або обмеження втрат електроенергії в струмопровідних оболонках (екранах). Згідно з Главою 2.3 ПУЕ цей спосіб слід обов'язково застосовувати для кабельних вставок у ПЛ, якщо вставки мають вихід кабелів на конструкції повітряно-кабельного з'єднання (ПКЗ) з обох кінців (це дає змогу обслуговувати лінійну частину ПКЗ без зняття напруги). У випадках заземлення оболонки (екранів) кабелів з обох кінців КЛ (кабельної вставки) необхідно виконувати перевірку їх стійкості щодо протікання [1-2]:

– тривалих струмів, обумовлених протіканням струмів у жилах кабелів в нормальному режимі роботи;

– тривалих струмів у разі однофазного замикання на землю (ОЗЗ) в мережі з ізольованою нейтраллю;

– короточасних струмів, обумовлених ОЗЗ в мережі з ефективно або глухозаземленою нейтраллю.

Для КЛ напругою від 6 кВ до 330 кВ у разі заземлення струмопровідних екранів кабелів з обох кінців (спосіб 1) потрібно перевіряти номінальний переріз екрана за значенням наведеного струму від протікання жилою КЛ струму нормального робочого режиму.

Розрахунок наведених струмів в екранах кабелів у разі заземлення струмопровідних екранів кабелів з обох кінців при розташуванні кабелів за схемою «у трикутник» впритул один до одного та за схемою «у площині» на відстані одного діаметра між кабелями унормовано пунктом 2.3.122 ПУЕ-2017 [2], а саме:

«Для КЛ напругою від 6 кВ до 330 кВ у разі заземлення струмопровідних екранів кабелів з обох кінців (див. 2.3.124, спосіб 1) потрібно перевіряти номінальний переріз екрана за значенням наведеного струму від протікання жилою КЛ струму нормального робочого режиму. Значення наведеного струму в екрані в разі розташування кабелів за схемою «у трикутник» впритул один до одного визначають за формулою:

$$I_E = I_{KL} \sqrt{\frac{0,0019}{R_{70}^2 + 0,0019}}, \quad (2.3.2)$$

де I_E – наведений струм екрана, А;

I_{KL} – максимальний робочий струм КЛ, А;

R_{70} – питомий активний опір екрана кабелю за температури 70 °С, Ом/км.

Питомий активний опір екрана кабелю розраховують множенням значення опору за стандартної температури 20 °С на коефіцієнт 1,19 для екрана із міді і 1,2 – для екрана з алюмінію.

Значення наведеного струму в екрані в разі розташування кабелів за схемою «у площині» на відстані одного діаметра між кабелями визначають за формулою:

$$I_E = I_{KL} \sqrt{0,75 \frac{0,017}{R_{70}^2 + 0,017} + 0,25 \frac{0,01}{R_{70}^2 + 0,01}}, \quad (2.3.3)$$

де I_E , I_{KL} , R_{70} – параметри відповідно до формули (2.3.2).

Якщо КЛ напругою від 6 кВ до 35 кВ приєднують до РУ ПС, яка має інші РУ напругою 110 кВ і вище, то номінальний переріз струмопровідних екранів кабелю, який заземлюють з обох кінців приєднанням до заземлювачів ПС, потрібно додатково перевіряти на можливу максимальну величину протікання в них струму однофазного КЗ, яке може виникнути на РУ напругою 110 кВ і вище».

Схожі розрахункові співвідношення використовують автори в [6-8]. Підходи, викладені в [9-10], є складними для використання в інженерній практиці (вимагають спеціалізованого програмного забезпечення), а [11], не зважаючи на анонсовану сферу застосування, взагалі не розглядає питання визначення втрат потужності і енергії в екранах кабелів КЛ. Разом з тим, як показано в [12], похибки відомих наближених розрахунків струмів в екранах кабелів можуть сягати 30%, що не може задовольнити потреби практики.

Метою дослідження є пошук компромісу між точністю та складністю розрахунків втрат електричної потужності та енергії в КЛ загалом і зокрема в екранах одножильних кабелів з екструдованою ізоляцією.

Завданнями досліджень є спрощення наведених у [13] співвідношень для інженерних розрахунків і визначення коефіцієнту втрат в екранах кабелів λ для передбачених в [1, 2] способів прокладання у вигляді таблиць, в яких λ є функцією матеріалу і перерізу жили кабелю, перерізу екрану та способу прокладання.

Матеріал і результати досліджень.

Співвідношення для сил струмів і втрат потужності

Згідно з [13] значення коефіцієнта втрат в оболонці або екрані λ_1 отримують шляхом додавання значень коефіцієнтів втрат λ'_1 , які обумовлені поздовжніми струмами оболонок чи екранів, та вихровими струмами λ''_1 наступним чином:

$$\lambda_1 = \lambda'_1 + \lambda''_1. \quad (2)$$

Відповідно до [13] $\lambda''_1 = 0$ (за винятком кабелів великого перерізу із сегментними жилами типу Мілікен). Для одножильних кабелів з оболонками, з'єднаними з обох кінців електричної секції, слід враховувати лише втрати внаслідок поздовжніх струмів в оболонках (електричною секцією вважають частину траси між точками, в яких з'єднані оболонки або екрани всіх кабелів КЛ).

Втрати в оболонці кабелю обчислюють через загальні втрати у жилі (жилах) із зазначенням у кожному окремому випадку конкретного виду втрат. Для трьох одножильних кабелів (розташованих трикутником), оболонки яких з'єднані на обох кінцях секції, коефіцієнт втрат λ'_1 обчислюють за простою формулою:

$$\lambda'_1 = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{екр}}}{X_E}\right)^2} = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \frac{1}{\frac{X_E^2 + R_{\text{екр}}^2}{X_E^2}} = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \frac{X_E^2}{X_E^2 + R_{\text{екр}}^2}, \quad (3)$$

де X_E – питомий індуктивний опір екрана, Ом/км;

$R_{\text{екр}}$ – питомий активний опір екрана, Ом/км;

$R_{\text{жили}}$ – питомий активний опір жили кабелю, Ом/км.

Значення $R_{\text{екр}}$ і $R_{\text{жили}}$ для температури 70°C і 90°C відповідно приймають за каталогом виробника.

Питомий індуктивний опір екрана, в Ом/км, розраховують за формулою:

$$X_E = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-4} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot s}{d_E} \right), \quad (4)$$

де s – середня геометрична відстань між центрами жил кабелів, мм;

d_E – середній діаметр екрану, мм;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова частота, рад/с.

Середній діаметр екрану приймають за даними виробника або розраховують за формулою (рис. 1):

$$d_E = D_K - (2 \cdot \delta_o + 2 \cdot \delta_3 + \delta_E), \quad (5)$$

де D_K – зовнішній діаметр кабелю, мм;

δ_o – товщина зовнішньої захисної оболонки кабелю, мм;

δ_3 – загальна товщина шарів між екраном і зовнішньою захисною оболонкою кабелю, мм;

δ_E – товщина екрану, мм.

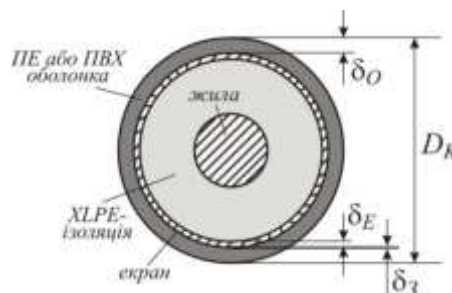


Рисунок 1 – Конструкція одножильного кабелю з ізоляцією зі зшитого потієтилену

За розташування кабелів впритул у вершинах рівностороннього трикутника (рис.2,а) застосовують $s = D_K$, де D_K – зовнішній діаметр кабелю, мм.

Як випливає з наведеного, обчислення коефіцієнту втрат (відповідно і втрат в екранах кабелів) не викликає труднощів у разі розташування кабелів за схемою «у трикутник» впритул.

У разі розташування трьох одножильних кабелів у площині (рис.2, б), де середній кабель рівновіддалений від крайніх, відповідно до [13] розрахунки втрат в екранах ускладнюються.

Коефіцієнт втрат для зовнішнього кабелю з найбільшими втратами (зовнішнього кабелю, що несе відстаючу фазу) λ'_{11} обчислюють за формулою:

$$\lambda'_{11} = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \left[\frac{A^2}{R_{\text{екр}}^2 + A^2} + \frac{0,25 \cdot B^2}{R_{\text{екр}}^2 + B^2} + \frac{2 \cdot R_{\text{екр}} \cdot A \cdot B \cdot X_M}{\sqrt{3} \cdot (R_{\text{екр}}^2 + A^2) \cdot (R_{\text{екр}}^2 + B^2)} \right]; \quad (6)$$

коефіцієнт втрат λ'_{12} для зовнішнього кабелю з найменшими втратами обчислюють за формулою:

$$\lambda'_{12} = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \left[\frac{A^2}{R_{\text{екр}}^2 + A^2} + \frac{0,25 \cdot B^2}{R_{\text{екр}}^2 + B^2} - \frac{2 \cdot R_{\text{екр}} \cdot A \cdot B \cdot X_M}{\sqrt{3} \cdot (R_{\text{екр}}^2 + A^2) \cdot (R_{\text{екр}}^2 + B^2)} \right], \quad (7)$$

а для середнього кабелю коефіцієнт втрат λ'_{1M} обчислюють за формулою:

$$\lambda'_{1M} = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \frac{B^2}{R_{\text{екр}}^2 + B^2}. \quad (8)$$

В рівняннях (6) – (8) згідно з [13]:

$$A = X_E + X_M, \quad (9)$$

$$B = X_E - \frac{X_M}{3}, \quad (10)$$

$$X_M = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-4} \cdot \ln(2) = 0,044. \quad (11)$$

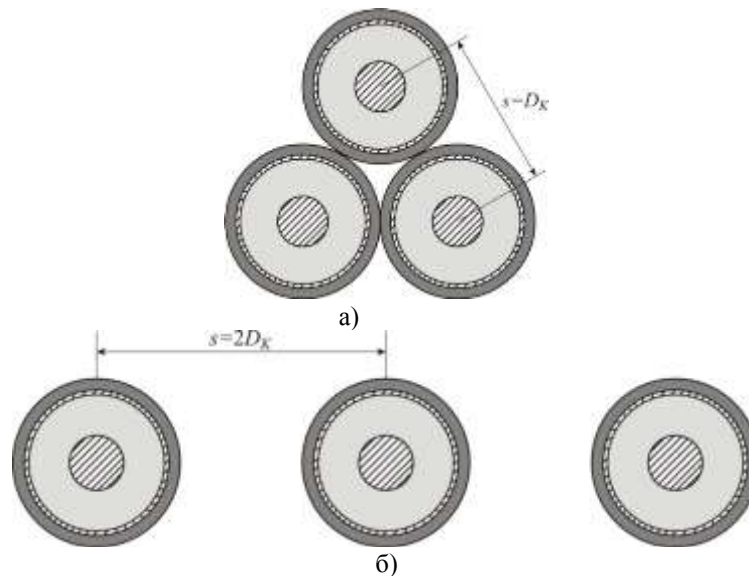


Рисунок 2 – Унормовані розташування кабелів у траншеї [1-2, 14-15]

Як видно, відповідно до [13] порядок розрахунку втрат в екранах одножильних кабелів, розташованих у площині, передбачає послідовне обчислення:

- 1) X_E і X_M ;
- 2) A і B ;
- 3) λ'_{11} , λ'_{12} і λ'_{1M} ;
- 4) струму фази кабелю I ;
- 5) втрат потужності в жилі кабелю ΔP_C ;
- 6) втрат потужності в екрані кожної i -ї фази кабелю ΔP_{Si} ;
- 7) сумарних втрат потужності в КЛ $\Delta P_{\text{КЛ}}$.

Не порушуючи принципів [13] цей порядок можна дещо спростити, якщо увести поняття еквівалентного коефіцієнта втрат $\lambda_{\text{площина}}$, який для передбаченого [1-2, 14-15] випадку розташування кабелів «у площині» через діаметр (коли $s = 2 \cdot D_K$) обчислюється за формулою:

$$\lambda_{\text{площина}} = \frac{\lambda'_{11} + \lambda'_{12} + \lambda'_{1M}}{3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \left(\left[\frac{A^2}{R_{\text{екр}}^2 + A^2} + \frac{0,25 \cdot B^2}{R_{\text{екр}}^2 + B^2} + \frac{2 \cdot R_{\text{екр}} \cdot A \cdot B \cdot X_M}{\sqrt{3} \cdot (R_{\text{екр}}^2 + A^2) \cdot (R_{\text{екр}}^2 + B^2)} \right] + \left[\frac{A^2}{R_{\text{екр}}^2 + A^2} + \frac{0,25 \cdot B^2}{R_{\text{екр}}^2 + B^2} - \frac{2 \cdot R_{\text{екр}} \cdot A \cdot B \cdot X_M}{\sqrt{3} \cdot (R_{\text{екр}}^2 + A^2) \cdot (R_{\text{екр}}^2 + B^2)} \right] + \frac{B^2}{R_{\text{екр}}^2 + B^2} \right) = \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \left(\frac{3 \cdot A^2 \cdot B^2 + 1,5 \cdot R_{\text{екр}}^2 \cdot (A^2 + B^2)}{(A^2 + R_{\text{екр}}^2) \cdot (B^2 + R_{\text{екр}}^2)} \right) = \frac{R_{\text{екр}}}{R_{\text{жили}}} \cdot \left(\frac{A^2 \cdot B^2 + 0,5 \cdot R_{\text{екр}}^2 \cdot (A^2 + B^2)}{(A^2 + R_{\text{екр}}^2) \cdot (B^2 + R_{\text{екр}}^2)} \right). \quad (12)$$

За симетричного навантаження загальні втрати в кабелях $\Delta P_{\text{КЛ}}$ у разі заземлення їх екранів з обох кінців КЛ не перевищить значення, обчисленого за формулою:

$$\Delta P_{\text{КЛ}} = 3 \cdot I_{\text{ж}}^2 \cdot R_{\text{ж}(+90^\circ\text{C})} \cdot (1 + \lambda), \quad (13)$$

де $I_{\text{ж}}$ – сила струму в жилі кабелю, А.

Коефіцієнт втрат λ обчислюють за (3) – у разі розташування кабелів за схемою «у трикутник» впритул або за (12) – у разі розташування кабелів за схемою «у площині» через діаметр.

Отже, з використанням (12) алгоритм обрахування втрат потужності в екранах одножильних кабелів, розташованих у площині, скорочується і передбачає послідовне обчислення:

- 1) X_E і X_M ;
- 2) A і B ;
- 3) $\lambda_{\text{площина}}$;
- 4) струму фази кабелю I ;
- 5) сумарних втрат в КЛ $\Delta P_{\text{кл}}$.

Еквівалентне за втратами в екранах КЛ значення наведеної в екранах сили струму I_{EE} у разі розташування кабелів за схемою «у площині» визначають за формулою:

$$I_{EE} = I_{\text{ж}} \cdot \sqrt{\frac{A^2 \cdot B^2 + 0,5 \cdot (A^2 + B^2) \cdot R_{E(+70^\circ\text{C})}^2}{(A^2 + R_{E(+70^\circ\text{C})}^2) \cdot (B^2 + R_{E(+70^\circ\text{C})}^2)}} = I_{\text{ж}} \cdot \sqrt{\lambda}, \quad (14)$$

а найбільше значення сили струму в екрані кабелю відстаючої фази обчислюють за формулою:

$$I_{E \max} = k \cdot I_{EE}, \quad (15)$$

де $k = 1,16$ – коефіцієнт, визначений за наведеними вище співвідношеннями.

У таблицях додатку до цієї публікації наведено значення коефіцієнтів втрат λ для одножильних кабелів середньої, високої та надвисокої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з алюмінієвими та мідними жилами, якими передбачено доповнити [11]. Значення параметрів кабелів, які було використано у розрахунках наведених в додатку коефіцієнтів втрат λ , було прийнято згідно з [14-15].

Відповідно до [11] втрати енергії в елементах електричних мереж належить обраховувати з урахуванням форми графіка навантаження. За рівня інформаційного забезпечення А і симетричного навантаження втрати активної енергії в КЛ, у кВт·год, пропонується обчислювати за формулою:

$$\Delta W_{\text{кл}}^P = 3 \cdot I_{\text{ж}}^2 \cdot R_{\text{ж}(+90^\circ\text{C})} \cdot k_{\Phi}^2 \cdot T_p \cdot (1 + \lambda) \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

де k_{Φ}^2 – квадрат коефіцієнта форми графіка навантаження КЛ [11, 17];

T_p – час роботи КЛ під навантаженням, годин.

За рівня інформаційного забезпечення Б і симетричного навантаження втрати активної енергії в КЛ, у кВт·год, за час від T_1 до T_2 , пропонується обчислювати за формулою:

$$\Delta W_{\text{кл}}^P = 3 \cdot (1 + \lambda) \cdot 10^{-3} \cdot \sum_{T_1}^{T_2} (I_{\text{ж}t}^2 \cdot \Delta T_t \cdot R_{\text{ж}t}), \quad (17)$$

де $I_{\text{ж}t}$ – діюче значення сили струму навантаження жили кабелю протягом t -го проміжку часу з умовно сталим навантаженням;

ΔT_t – тривалість t -го проміжку часу з умовно сталим навантаженням за час від T_1 до T_2 ;

$R_{\text{ж}t}$ – активний опір жили кабелю протягом t -го проміжку часу з умовно сталим навантаженням.

Примітка 1. В [11, 17] значення k_{Φ}^2 наведено для $\Delta T_t = 1$ год.

Примітка 2. У разі відсутності відомостей щодо $R_{\text{ж}t}$ дозволено застосовувати $R_{\text{ж}t} = R_{\text{ж}(+90^\circ\text{C})}$, що дає верхню границю можливих втрат активної енергії.

Висновок. Використання коефіцієнтів втрат λ , наведених у таблицях додатку, спрощує розрахунки втрат потужності та енергії в кабелях без втрати точності.

Список використаної літератури

1. СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (зі змінами) (в редакції Наказу Міністерства енергетики та теплоенергетики України від 26.01.2017 № 82)
2. ПУЕ-2017 Правила улаштування електроустановок.
3. ГКД 340.000.002-97 Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі.
4. Примірний методика визначення вартості життєвого циклу, затверджена наказом Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України від 28.09.2020 № 1894
5. Ильин Н.М., Лукманова И.Г и др. Управление проектами. – СПб.: «Два-Три», 1996. – 610 с.
6. Методичні вказівки ЩЕП.МУ1-2019 Проектування заземлення екранів кабелів ЗПЕ в мережах 6 - 35 кВ. Дніпро: «Енергопроект». – 2019. – 26 с.
7. Методичні вказівки ЩЕП.МУ2-2019 Проектування заземлення екранів кабелів ЗПЕ в мережах 110 - 330 кВ. Дніпро: «Енергопроект». – 2019. – 20 с.
8. Щепенюк Л.А., Антоненко Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №3. – С. 152-157.
9. Быстров А.В. Разработка методики выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-500 кВ: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / А.В. Быстров. – Москва, 2014. – 20 с.

10. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. – Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. – 154 с.
11. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82:2013 Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання
12. Grinchenko V.S., Tkachenko O.O., Grinchenko N.V. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line //Електротехніка і Електромеханіка. – 2017. – №2. – С. 39-42. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.06
13. ДСТУ ІЕС 60287-1-1:2009 (ІЕС 60287-1-1:2001, IDT) Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100%) і обчислення втрат. Загальні положення.
14. YUZHicable. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу від 6 до 35 кВ. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://yuzhicable.com.ua/downloads-ukr/>
15. YUZHicable. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу від 45 до 330 кВ. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://yuzhicable.com.ua/downloads-ukr/>
16. Альбом типових графіків електричних навантажень електричних мереж, затверджений наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 06.04.2017 № 267. [Електронний ресурс]. Режим доступу до сайту: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245201705.

Додаток

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з алюмінієвими жилами

Переріз жил мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²								У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²							
	16	25	35	50	70	95	120	150	16	25	35	50	70	95	120	150
на напругу 10 кВ																
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07
70	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.09	0.10
95	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.12	0.13	0.14
120	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.15	0.16	0.17
150	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.18	0.20	0.21
185	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.05	0.07	0.10	0.13	0.18	0.22	0.24	0.26
240	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.11	0.06	0.1	0.13	0.17	0.23	0.29	0.32	0.34
300	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.12	0.14	0.08	0.12	0.16	0.21	0.28	0.35	0.39	0.41
400	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.12	0.14	0.17	0.1	0.15	0.20	0.27	0.36	0.44	0.49	0.52
500	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.18	0.22	0.13	0.19	0.26	0.34	0.46	0.57	0.63	0.67
630	0.03	0.05	0.07	0.09	0.13	0.18	0.22	0.27	0.16	0.24	0.33	0.43	0.57	0.70	0.78	0.83
800	0.04	0.06	0.09	0.12	0.17	0.22	0.27	0.32	0.20	0.3	0.41	0.53	0.72	0.89	0.99	1.05
1000	0.05	0.08	0.11	0.14	0.20	0.28	0.34	0.40	0.25	0.38	0.52	0.68	0.91	1.13	1.26	1.34
на напругу 20 кВ																
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07
70	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10
95	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.13
120	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.14	0.16	0.17
150	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19	0.20
185	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.05	0.07	0.1	0.13	0.17	0.22	0.24	0.25
240	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.09	0.11	0.06	0.09	0.13	0.17	0.23	0.28	0.31	0.33
300	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.08	0.12	0.16	0.21	0.28	0.34	0.38	0.41
400	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.12	0.14	0.17	0.10	0.15	0.2	0.26	0.35	0.44	0.49	0.52
500	0.03	0.04	0.06	0.07	0.11	0.14	0.18	0.21	0.13	0.19	0.26	0.33	0.45	0.55	0.61	0.65
630	0.03	0.05	0.07	0.09	0.13	0.18	0.22	0.26	0.16	0.24	0.32	0.42	0.57	0.70	0.78	0.83
800	0.04	0.06	0.08	0.11	0.16	0.22	0.27	0.32	0.20	0.30	0.4	0.53	0.71	0.88	0.98	1.04
1000	0.05	0.08	0.11	0.14	0.20	0.28	0.34	0.40	0.25	0.38	0.51	0.67	0.90	1.12	1.25	1.33
на напругу 35 кВ																
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06
70	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.09
95	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.12	0.13
120	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.08	0.11	0.14	0.15	0.16
150	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.04	0.06	0.08	0.10	0.14	0.17	0.19	0.20

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з алюмінієвими жилами (продовження)

Переріз жили, мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²									У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²								
	16	25	35	50	70	95	120	150		16	25	35	50	70	95	120	150	
185	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08		0.05	0.07	0.10	0.13	0.17	0.21	0.23	0.25	
240	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.10		0.06	0.09	0.13	0.16	0.22	0.28	0.31	0.32	
300	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.11	0.13		0.08	0.11	0.16	0.20	0.27	0.34	0.38	0.40	
400	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.13	0.16		0.10	0.15	0.20	0.26	0.35	0.43	0.48	0.51	
500	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.14	0.17	0.20		0.12	0.18	0.25	0.33	0.44	0.55	0.61	0.65	
630	0.03	0.05	0.07	0.09	0.13	0.17	0.21	0.25		0.15	0.23	0.32	0.42	0.56	0.69	0.77	0.82	
800	0.04	0.06	0.08	0.11	0.16	0.22	0.26	0.31		0.19	0.29	0.40	0.52	0.70	0.87	0.97	1.03	
1000	0.05	0.07	0.10	0.14	0.20	0.27	0.33	0.39		0.25	0.38	0.51	0.67	0.90	1.12	1.25	1.33	

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів високої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з алюмінієвими жилами

Переріз жили, мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²						У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²					
	95	120	150	185	240	300	95	120	150	185	240	300
на напругу 110 кВ												
185	0.06	0.07	0.08	0.1	0.11	0.12	0.21	0.24	0.25	0.26	0.25	0.23
240	0.07	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.28	0.31	0.33	0.33	0.32	0.30
300	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.19	0.34	0.38	0.41	0.41	0.40	0.38
350	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.38	0.43	0.45	0.46	0.45	0.42
400	0.11	0.14	0.16	0.19	0.23	0.25	0.44	0.48	0.51	0.53	0.51	0.48
500	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.55	0.62	0.65	0.67	0.65	0.61
630	0.18	0.22	0.26	0.31	0.36	0.39	0.70	0.78	0.83	0.85	0.83	0.78
800	0.22	0.27	0.32	0.38	0.45	0.49	0.88	0.98	1.05	1.08	1.05	0.98
1000	0.28	0.34	0.4	0.47	0.56	0.61	1.12	1.25	1.33	1.37	1.34	1.26
1200	0.33	0.40	0.47	0.56	0.66	0.73	1.33	1.48	1.58	1.62	1.59	1.49
1400	0.37	0.45	0.53	0.63	0.75	0.82	1.51	1.68	1.8	1.85	1.81	1.70
1600	0.41	0.5	0.59	0.7	0.83	0.92	1.69	1.88	2.01	2.07	2.02	1.90
2000	0.51	0.62	0.74	0.87	1.03	1.14	2.10	2.34	2.5	2.58	2.52	2.38
на напругу 150 кВ												
300	0.08	0.1	0.12	0.14	0.17	0.19	0.34	0.37	0.4	0.41	0.40	0.37
350	0.09	0.12	0.14	0.16	0.19	0.21	0.38	0.42	0.44	0.46	0.45	0.42
400	0.11	0.13	0.16	0.18	0.22	0.24	0.43	0.48	0.51	0.52	0.51	0.48
500	0.14	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.54	0.61	0.65	0.66	0.65	0.61
630	0.17	0.21	0.25	0.30	0.35	0.38	0.69	0.77	0.82	0.85	0.82	0.77
800	0.22	0.26	0.31	0.37	0.44	0.48	0.87	0.97	1.04	1.07	1.04	0.98
1000	0.27	0.33	0.40	0.47	0.55	0.61	1.12	1.24	1.33	1.37	1.33	1.26
1200	0.32	0.39	0.47	0.55	0.65	0.72	1.32	1.47	1.57	1.62	1.58	1.49
1400	0.36	0.44	0.53	0.62	0.74	0.82	1.50	1.68	1.79	1.85	1.80	1.70
1600	0.40	0.49	0.59	0.70	0.83	0.91	1.68	1.88	2.00	2.06	2.02	1.90
2000	0.50	0.61	0.73	0.86	1.03	1.13	2.10	2.34	2.50	2.57	2.52	2.37

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів надвисокої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з алюмінієвими жилами

Переріз жили, мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²				У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²			
	95	120	150	185	95	120	150	185
на напругу 220 кВ								
400	0.11	0.14	0.17	0.19	0.44	0.49	0.52	0.53
500	0.14	0.18	0.21	0.25	0.56	0.62	0.66	0.67
630	0.18	0.22	0.26	0.31	0.71	0.79	0.84	0.86
800	0.23	0.28	0.33	0.39	0.89	0.99	1.06	1.08

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів надвисокої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з алюмінієвими жилами (продовження)

Переріз жили, мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²				У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²			
	95	120	150	185	95	120	150	185
1000	0.29	0.35	0.42	0.49	1.14	1.27	1.35	1.39
1200	0.34	0.41	0.49	0.58	1.35	1.50	1.60	1.64
1400	0.38	0.47	0.56	0.66	1.53	1.71	1.82	1.87
1600	0.43	0.52	0.62	0.73	1.72	1.91	2.04	2.09
на напругу 330 кВ								
500	0.14	0.17	0.20	0.24	0.55	0.61	0.65	0.67
630	0.18	0.21	0.25	0.3	0.7	0.78	0.83	0.85
800	0.22	0.27	0.32	0.38	0.88	0.98	1.04	1.07
1000	0.28	0.34	0.41	0.48	1.13	1.26	1.34	1.38
1200	0.33	0.40	0.48	0.57	1.34	1.49	1.59	1.63
1400	0.37	0.46	0.54	0.64	1.52	1.69	1.81	1.86
1600	0.42	0.51	0.61	0.71	1.70	1.89	2.02	2.08

Таблиця 4 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з мідними жилами

Пере- різ жили мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²									У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²								
	16	25	35	50	70	95	120	150		16	25	35	50	70	95	120	150	
на напругу 10 кВ																		
35	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.08		
50	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.10	0.11	0.12		
70	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.03	0.05	0.07	0.09	0.12	0.14	0.16	0.16		
95	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.04	0.07	0.09	0.12	0.16	0.19	0.21	0.23		
120	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.05	0.08	0.11	0.15	0.19	0.24	0.27	0.28		
150	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.09	0.10	0.12	0.07	0.10	0.14	0.18	0.24	0.29	0.32	0.34		
185	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.08	0.12	0.17	0.22	0.30	0.36	0.40	0.43		
240	0.02	0.04	0.05	0.07	0.10	0.13	0.16	0.19	0.11	0.16	0.22	0.29	0.38	0.48	0.53	0.56		
300	0.03	0.04	0.06	0.08	0.12	0.16	0.19	0.23	0.13	0.20	0.27	0.35	0.47	0.58	0.65	0.68		
400	0.04	0.05	0.08	0.10	0.14	0.19	0.24	0.28	0.17	0.25	0.34	0.44	0.59	0.74	0.82	0.87		
500	0.05	0.07	0.10	0.13	0.18	0.25	0.30	0.35	0.21	0.32	0.43	0.56	0.75	0.94	1.04	1.10		
630	0.05	0.08	0.11	0.15	0.22	0.30	0.36	0.43	0.26	0.39	0.53	0.70	0.93	1.15	1.28	1.36		
800	0.07	0.10	0.14	0.18	0.26	0.35	0.43	0.51	0.31	0.47	0.64	0.84	1.13	1.41	1.57	1.67		
1000	0.08	0.12	0.17	0.23	0.32	0.44	0.54	0.64	0.40	0.61	0.82	1.08	1.45	1.80	2.00	2.13		
на напругу 20 кВ																		
35	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.08		
50	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.11	0.11		
70	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.03	0.05	0.06	0.08	0.11	0.14	0.15	0.16		
95	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06	0.09	0.11	0.15	0.19	0.21	0.22		
120	0.01	0.02	0.03	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.05	0.08	0.11	0.14	0.19	0.24	0.26	0.28		
150	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.11	0.07	0.10	0.13	0.17	0.23	0.29	0.32	0.34		
185	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.12	0.14	0.08	0.12	0.17	0.22	0.29	0.36	0.40	0.42		
240	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.13	0.15	0.18	0.10	0.16	0.21	0.28	0.38	0.46	0.51	0.54		
300	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.18	0.22	0.13	0.19	0.26	0.34	0.46	0.57	0.63	0.67		
400	0.03	0.05	0.07	0.10	0.14	0.19	0.24	0.28	0.16	0.25	0.33	0.44	0.59	0.73	0.81	0.86		
500	0.04	0.07	0.09	0.12	0.17	0.24	0.29	0.34	0.21	0.31	0.42	0.55	0.74	0.91	1.01	1.08		
630	0.05	0.08	0.11	0.15	0.21	0.29	0.35	0.42	0.26	0.39	0.52	0.69	0.92	1.15	1.28	1.36		
800	0.06	0.1	0.13	0.18	0.25	0.35	0.43	0.51	0.31	0.47	0.64	0.83	1.12	1.39	1.55	1.65		
1000	0.08	0.12	0.17	0.23	0.32	0.44	0.54	0.64	0.40	0.60	0.81	1.06	1.43	1.77	1.97	2.10		
на напругу 35 кВ																		
50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11		
70	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.08	0.11	0.13	0.15	0.16		

Таблиця 4 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з мідними жилами (продовження)

Переріз жили мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²								У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²							
95	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15	0.18	0.20	0.21
120	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09	0.05	0.08	0.11	0.14	0.18	0.23	0.25	0.27
150	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.06	0.09	0.13	0.17	0.23	0.28	0.31	0.33
185	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.08	0.12	0.16	0.21	0.28	0.35	0.39	0.41
240	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.12	0.14	0.17	0.10	0.15	0.21	0.27	0.37	0.46	0.51	0.54
300	0.03	0.04	0.06	0.07	0.11	0.15	0.18	0.21	0.13	0.19	0.26	0.34	0.45	0.56	0.62	0.66
400	0.03	0.05	0.07	0.09	0.13	0.18	0.22	0.26	0.16	0.24	0.33	0.43	0.57	0.72	0.80	0.85
500	0.04	0.06	0.09	0.12	0.17	0.23	0.28	0.33	0.2	0.30	0.41	0.54	0.73	0.90	1.00	1.06
630	0.05	0.08	0.11	0.14	0.21	0.28	0.34	0.40	0.25	0.38	0.52	0.68	0.91	1.13	1.26	1.34
800	0.06	0.09	0.13	0.17	0.25	0.34	0.42	0.49	0.31	0.46	0.63	0.82	1.11	1.37	1.53	1.63
1000	0.08	0.12	0.16	0.22	0.31	0.42	0.52	0.62	0.40	0.60	0.81	1.06	1.43	1.77	1.97	2.10

Таблиця 5 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів високої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з мідними жилами

Переріз жили, мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²						У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²					
	95	120	150	185	240	300	95	120	150	185	240	300
на напругу 110 кВ												
185	0.09	0.11	0.13	0.16	0.18	0.20	0.35	0.39	0.41	0.42	0.41	0.38
240	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.26	0.46	0.51	0.54	0.55	0.54	0.50
300	0.15	0.18	0.21	0.25	0.30	0.32	0.57	0.63	0.67	0.69	0.67	0.62
350	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.35	0.62	0.69	0.73	0.75	0.73	0.69
400	0.19	0.23	0.27	0.32	0.37	0.41	0.72	0.80	0.85	0.87	0.85	0.80
500	0.23	0.29	0.34	0.40	0.47	0.51	0.91	1.01	1.08	1.11	1.08	1.01
630	0.29	0.36	0.43	0.50	0.59	0.64	1.15	1.28	1.36	1.39	1.36	1.27
800	0.35	0.43	0.51	0.60	0.71	0.78	1.40	1.55	1.66	1.70	1.66	1.55
1000	0.44	0.53	0.64	0.75	0.89	0.97	1.78	1.98	2.11	2.17	2.12	1.99
1200	0.50	0.61	0.72	0.85	1.01	1.10	2.02	2.25	2.41	2.48	2.42	2.27
1400	0.57	0.70	0.83	0.98	1.16	1.28	2.35	2.62	2.80	2.88	2.81	2.65
1600	0.64	0.78	0.93	1.10	1.30	1.43	2.64	2.94	3.14	3.23	3.16	2.98
2000	0.72	0.88	1.05	1.24	1.47	1.62	3.00	3.35	3.58	3.68	3.6	3.40
на напругу 150 кВ												
300	0.14	0.17	0.20	0.24	0.28	0.31	0.55	0.62	0.66	0.68	0.66	0.62
350	0.15	0.19	0.22	0.26	0.31	0.34	0.61	0.68	0.72	0.74	0.72	0.68
400	0.18	0.22	0.26	0.30	0.36	0.39	0.71	0.79	0.84	0.86	0.84	0.79
500	0.22	0.27	0.33	0.38	0.45	0.50	0.90	1.00	1.06	1.09	1.07	1.00
630	0.28	0.35	0.41	0.48	0.57	0.62	1.13	1.26	1.34	1.38	1.35	1.26
800	0.34	0.42	0.50	0.58	0.69	0.76	1.38	1.54	1.64	1.68	1.64	1.55
1000	0.43	0.53	0.63	0.74	0.88	0.96	1.77	1.97	2.10	2.16	2.11	1.99
1200	0.49	0.60	0.71	0.84	1.00	1.10	2.01	2.25	2.40	2.47	2.41	2.27
1400	0.56	0.69	0.82	0.97	1.15	1.27	2.34	2.61	2.79	2.87	2.81	2.64
1600	0.63	0.77	0.92	1.09	1.29	1.42	2.63	2.93	3.13	3.22	3.15	2.97
2000	0.72	0.88	1.04	1.23	1.46	1.61	2.99	3.34	3.57	3.68	3.6	3.39

Таблиця 6 – Значення коефіцієнта втрат λ для одножильних кабелів надвисокої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену з мідними жилами

Переріз жили, мм ²	У разі розташування кабелів «трикутником впритул» за перерізу екрану, мм ²				У разі розташування кабелів «в площині через діаметр» за перерізу екрану, мм ²			
	95	120	150	185	95	120	150	185
на напругу 220 кВ								
400	0.19	0.23	0.27	0.32	0.72	0.81	0.86	0.88
500	0.24	0.29	0.34	0.40	0.92	1.02	1.08	1.11
630	0.30	0.36	0.43	0.51	1.15	1.28	1.36	1.40
800	0.36	0.44	0.52	0.62	1.41	1.57	1.67	1.71
1000	0.46	0.56	0.67	0.78	1.81	2.01	2.14	2.20
1200	0.52	0.63	0.75	0.88	2.05	2.29	2.44	2.50
1400	0.60	0.73	0.87	1.02	2.39	2.66	2.83	2.91
1600	0.67	0.82	0.97	1.14	2.68	2.99	3.18	3.27
на напругу 330 кВ								
500	0.23	0.28	0.33	0.39	0.9	1	1.07	1.1
630	0.29	0.35	0.41	0.49	1.14	1.26	1.35	1.38
800	0.35	0.43	0.51	0.6	1.39	1.55	1.65	1.69
1000	0.45	0.54	0.65	0.76	1.79	1.99	2.12	2.18
1200	0.50	0.62	0.73	0.86	2.04	2.27	2.42	2.49
1400	0.58	0.71	0.85	1.00	2.37	2.64	2.81	2.89
1600	0.65	0.80	0.95	1.12	2.66	2.96	3.16	3.25

T. Antonets¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0009-0007-2388-2252R. Buinyi², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-5432-2924A. Vorushylo³, Ph. D. studentO. Gai⁴, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-5460-7260I. Petrenko⁴, Engineer, ORCID 0009-0009-0490-3569O. Tkachenko⁵, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-7307-7293¹PJSC “PIVDENKABEL PLANT”²Chernihiv Polytechnic National University³Institute of General Power Engineering of NAS of Ukraine⁴NPC “Ukrenergo”⁵Anatolii Pidhornyi Institute of power machines and systems of NAS of Ukraine

ABOUT POWER AND ELECTRICAL ENERGY LOSSES IN SINGLE-CORE CABLE SCREENS

The choice of the method of grounding the screens of extruded medium, high and extra-high voltage cables involves the implementation of an appropriate justification, the elements of which are power losses in the current-carrying conductors and cable screens. It is shown that the existing exact methods for calculating power losses in the screens of single-core cables are quite difficult, and the error of approximate calculation methods can reach 30%. A simple algorithm for calculating power losses in single-core cable screens is proposed, based on the approaches of the DSTU IEC 60287-1-1:2009 standard and providing acceptable accuracy for engineering calculations during the design and exploitation of cable power lines. The algorithm takes into account possible ways of placing cables in the cable line trench: trefoil phase formation and flat phase formation. It involves calculating the currents induced in the screens, equivalent in terms of power losses. To estimate the amount of electrical energy losses in cable lines, formulas have been proposed that also take into account the component of losses in cable screens for different levels of information support and the shape of the electrical load graph. The given formulas for calculating electrical energy losses are valid for symmetrical load in the cores of cable power line.

Based on the proposed algorithm, the values of loss factors were obtained for single-core cables with cross-linked polyethylene insulation of medium, high and ultra-high voltage with aluminum and copper cores of all typical cross-sections produced by cable manufacturing plants. The obtained values of the coefficients will simplify and speed up the calculation of power losses and electrical energy losses in cable lines during their design and exploitation. It is proposed to supplement the current regulatory documentation with the proposed algorithm and tables with the obtained values of the loss coefficient.

Keywords: cable lines, cable screens, power losses, electrical energy losses.

References

1. SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011 Design of cable lines with voltage up to 330 kV. Guidelines (as amended) (as amended by the Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of 01/26/2017 № 82)
2. PUE-2017 Rules for the arrangement of electrical installations.
3. GKD 340.000.002-97 Determination of the economic efficiency of capital investments in the energy sector. Methodology. Energy systems and electrical networks.
4. An exemplary methodology for determining life cycle cost, approved by the order of the Ministry of Economic Development, Trade and Agriculture of Ukraine dated 09/28/2020 № 1894
5. Ilyin N.M., Lukmanova I.G. et al. Project management. – SpB.: “Dva-Try”, 1996. – 610 p.
6. Methodological instructions ICEP.MU1-2019 Design of grounding of ZPE cable shields in networks 6 - 35 kV. Dnipro: “Energoproekt”. – 2019. – 26 p.
7. Methodological instructions ICEP.MU2-2019 Design of grounding of ZPE cable shields in networks 110 - 330 kV. Dnipro: “Energoproekt”. – 2019. – 20 p.
8. Schebenyuk L.A., Antonets T.Yu. To determine the carrying capacity of high-voltage power cables with plastic insulation // Bulletin of NTU “KhPI”. – 2011. – № 3. – P. 152-157.
9. Bystrov A.V. Development of a technique for choosing an energy-efficient system for grounding shields of single-core power cables with cross-linked polyethylene insulation for a voltage of 6-500 kV: autoref. thesis for the application candidate degree technical Science: 05.09.03 "Electrical complexes and systems" / A.V. Bystrov – Moscow, 2014. – 20 p.
10. Dmitriev M.V. Grounding of shields of single-phase power cables 6-500 kV. – St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House, 2010. – 154 p.
11. SOU-N EE 40.1-37471933-82:2013 Methodological recommendations for determining the technological costs of electric energy in transformers and power transmission lines
12. Grinchenko V.S., Tkachenko O.O., Grinchenko N.V. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line //Electrical Engineering and Electromechanics. – 2017. – № 2. – P. 39-42. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.06
13. DSTU IEC 60287-1-1:2009 (IEC 60287-1-1:2001, IDT) Electric cables. Calculation of nominal current. Part 1-1. Ratio for calculating the rated current (100% load factor) and calculating losses. General provisions.
14. YUZHicable. Power cables with cross-linked polyethylene insulation for voltage from 6 to 35 kV. [Electronic resource]. Available at: <https://yuzhcable.com.ua/downloads-ukr/>
15. YUZHicable. Power cables with cross-linked polyethylene insulation for voltage from 45 to 330 kV. [Electronic resource]. Available at: <https://yuzhcable.com.ua/downloads-ukr/>
16. Album of typical graphs of electrical loads of electrical networks, approved by the order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated 06.04.2017 № 267. [Electronic resource]. Site access mode: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245201705.

Надійшла: 01.04.2025

Received: 01.04.2025

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ І ОБЛАДНАННЯМ.

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.31

DOI 10.20535/1813-5420.2.2025.327362

Ю.В. Шерстньов¹, аспірант, ORCID 0009-0003-3210-5552

¹Криворізький Національний Університет

КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ НА ОСНОВІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДСТАНЦІ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА

У статті представлено результати моделювання централізованої системи компенсації реактивної потужності гірничозбагачувального підприємства на основі кіберфізичної моделі у контексті ефективного управління енергоспоживанням. Проаналізовано добові та річні дані обсягів споживання електричної енергії споживачами підстанцій підприємства. Запропоновано інноваційний підхід до моніторингу та оптимізації енергетичних потоків, спрямований на зменшення втрат і покращення енергетичної ефективності. Встановлено оптимальні умови використання синхронних двигунів та конденсаторних батарей. Модель базується на інтеграції сучасних технологій моніторингу та аналізу даних, що дозволяє адаптуватися до динамічних змін навантаження та оперативно коригувати параметри системи компенсації. Дослідження оцінює вплив розроблених методів на стабільність роботи енергосистеми підприємства та економічну складову впровадження запропонованих рішень. Отримані результати показують перспективність запропонованих рішень по компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності виробництва.

Ключові слова: гірничозбагачувальні комбінати, енергоефективність, конденсаторні батареї, синхронні двигуни, реактивна потужність, активна потужність.

Вступ

Енергетична ефективність є ключовим фактором у підвищенні конкурентоспроможності гірничозбагачувальних підприємств (ГЗК), які належать до найбільш енергоємних промислових об'єктів. В поточних реаліях склалася ситуація суттєвого обмеження обсягів споживання електричної потужності. Через це знижується завантаженість трансформаторів, асинхронних двигунів, що призводить до збільшення частки реактивної потужності (РП). Додатково можливі відключення «природних» компенсаторів – синхронних двигунів (СД). В такій ситуації виникає необхідність створення багатокритеріальної централізованої системи обліку та контролю перетікання реактивної потужності, що базується на інтеграції інформаційних і автоматизованих технологій (тобто розглядати мережу як кіберфізичну систему (КФС)). Така система дозволить оптимізувати розподіл РП в режимі реального часу, зменшити навантаження на мережі та знизити втрати активної енергії. Обґрунтоване впровадження централізованого управління забезпечить гнучке регулювання реактивної потужності та створить умови для підвищення надійності електропостачання й ефективного використання ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз проведених досліджень свідчить про перспективність впровадження централізованих систем управління перетіканням реактивної потужності [1, 2, 3]. У роботах окремих авторів підтверджено переваги розподіленої компенсації для покращення коефіцієнта потужності в окремих вузлах електроенергетичної системи [1]. Водночас автоматизовані централізовані системи керування перетіканням реактивної потужності в промислових мережах демонструють підвищення енергоефективності на 15–20% залежно від специфічних умов [2]. Завдяки централізованому управлінню забезпечується більш точне регулювання розподілу реактивної потужності [3].

Прогнозування споживання реактивної потужності є складним через стохастичний характер її поведінки. Через це є необхідність використання системи моніторингу та контролю компенсуючими пристроями у реальному часі, або використовувати методи короткочасного прогнозування [4]. У випадку змінного навантаження, що залежить від багатьох факторів (технологічних, сезонних, тощо), прогнозування із високим рівнем точності може забезпечити і двоступеневі алгоритми [5].

Застосування інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) дозволяє більш точно керувати та відслідковувати швидкі зміни в енергетичній системі [6]. При цьому забезпечити оптимальний розв'язок задачі керування можна за допомогою математичних методів оптимізації [7] для забезпечення мінімізації вірогідності інцидентів та збоїв, пов'язаними з обчислювальною та комунікаційною інфраструктурою [8].

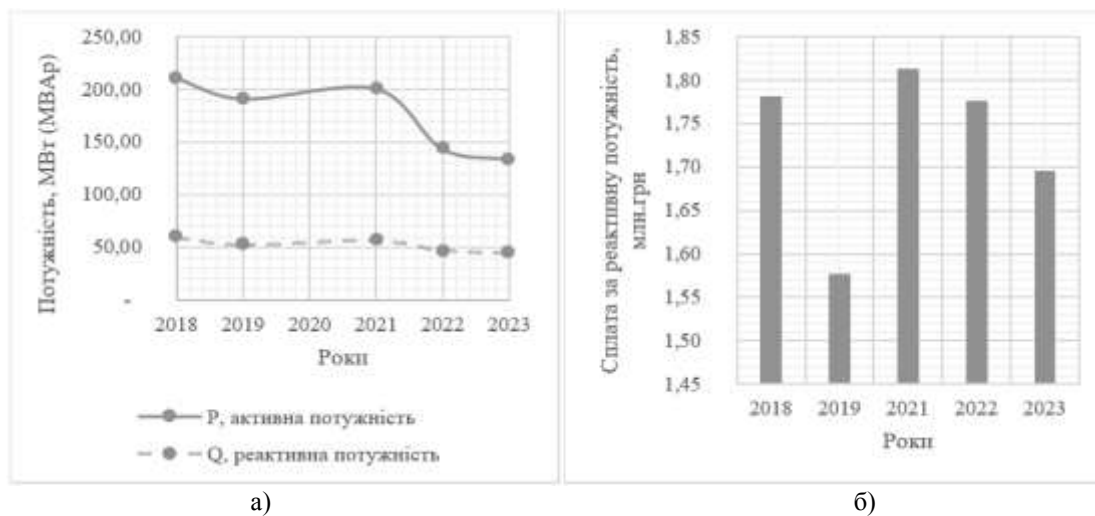
Метою дослідження є удосконалення математичної моделі процесу компенсації реактивної потужності на підприємствах гірничозбагачувального комплексу з урахуванням динаміки енергоспоживання, що дозволить мінімізувати втрати електроенергії, підвищити стабільність роботи електроенергетичної системи та зменшити експлуатаційні витрати.

Завдання дослідження: проаналізувати річну та добову динаміку споживання активної та реактивної потужності для визначення раціональних рівнів компенсації; розробити модель централізованої системи моніторингу та керування компенсаційними пристроями; провести моделювання і оцінити ефективність розробленої системи.

Матеріал і результати досліджень

Аналіз річних тенденцій у графіках споживання електричної енергії є ключовим етапом у розумінні поточної ситуації. На рис. 1 зображено споживання електричної енергії споживачами та сплата за неї на ГЗП №1 підприємства N. Ситуація, коли реактивна потужність залишається сталою, створює виклики для управління енергетичними ресурсами. Зокрема, високий рівень реактивного навантаження призводить до неефективного використання трансформаторів і електродвигунів, які працюють у режимі недозавантаженості.

Також підприємство сплачує не лише за фактичний рівень спожитої реактивної потужності, але й додаткові кошти за недокомпенсацію. На даних графіках помітне суттєве зниження обсягів споживання електричної енергії за останні роки (найбільший спад спостерігався у 2022-му році, на 28,5% для активної та 17,44% для реактивної потужності споживачами ГЗП №1). При цьому через збільшення тарифів, сплата за реактивну потужність знизилася лише на 2%.



а) - споживання електричної енергії споживачами ГЗП за 2018-2023рр.; б) - сплата за реактивну потужність за 2018-2023рр.

Рисунок 1 – Статистичні дані по ГЗП №1 за різні роки

Електричні мережі промислових підприємств є досить складними структурами з великою кількістю споживачів з різкозмінним характером навантаження. В свою чергу, самі підстанції є також складовими ще більшої енергетичної системи. Врахування усіх складових у такому випадку буде дуже складним та нерациональним по відношенню до затрачуваних розрахункових потужностей. Тому доцільним буде розглянути окрему структуру розподільної підстанції (РП), як частину енергетичної системи підприємства.

Для цього були проаналізовані схеми електричні принципи живильних мереж, і було виявлено наступне: найбільш розповсюдженим варіантом (у випадку РП дробильно-збагачувальної фабрики (ДЗФ)) є наступне: наявність асинхронних двигунів (АД) на шинах 0,4кВ та 6кВ; наявність СД на шинах 6кВ; наявність конденсаторних батарей (КБ) на шинах 0,4кВ та 6кВ.

Рівень генерації конденсаторних батарей регулюється дискретно. У випадку наявності синхронних двигунів в активі підприємства, оцінюється доцільність їх використання у процесі компенсації реактивної потужності. Для цього централізована система моніторить технологічні показники СД (їх число, температуру охолоджуючого повітря, температуру обмоток статора та побічно ротора, живлячу напругу) з метою не перевищення допустимих значення цих параметрів [9]. При цьому граничне значення відносних повних потужностей двигунів, які можна залучити у режим компенсації, визначається наступним чином [10]:

$$S_{\text{гран.}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{н}}}{U}\right)^2 S_{\text{н}}^2 \left(1 + \frac{t_{\text{гр.о.п.}}^{\circ} - t_{\text{р}}^{\circ}}{\Delta t_{\text{гран.}}^{\circ}}\right)}, \quad (1)$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга двигуна, В; U – значення напруги на затискачах СД, В; $S_{\text{н}}$ – повна номінальна потужність двигуна, кВА; $t_{\text{гр.о.п.}}^{\circ}$ – гранично допустима температура охолоджуючого повітря; $t_{\text{р}}^{\circ}$ – поточна температура охолоджуючого повітря; $\Delta t_{\text{гран.}}^{\circ}$ – гранично допустиме підвищення температури обмоток статора.

Централізована система керування перетіканням реактивної потужності має враховувати стохастичну природу добових коливань споживання активної та реактивної потужності. З огляду на випадковий характер цих змін, ефективна система має бути здатною швидко й точно адаптуватися до змін енергетичного навантаження в реальному часі.

Централізована система, зображена на рис. 2 побудована на основі інтелектуальної обробки даних із лічильників, розміщених на вузлових точках електромережі. Ці лічильники постійно відслідковують балансні значення перетікання реактивної потужності (для синхронних двигунів – їх технологічні параметри). Система використовує принципи адаптивного управління, що дозволяють автоматично регулювати роботу компенсуючих пристроїв відповідно до змін у споживанні енергії.

Централізована система змінює компенсуючу здатність СД №1...СД №N (регулюючи $U_{\text{зб.сд.1...}} U_{\text{зб.сд.N}}$) та переключаючи ступені КБ ($\text{КБ}_{\text{бкв}}$ та $\text{КБ}_{0,4\text{кв}}$). Рациональніше використовувати насамперед конденсаторні батареї (КБ), оскільки їхні втрати становлять у середньому 0,002–0,0045 кВт/кВАр, тоді як для синхронних двигунів (СД) цей показник сягає 0,013 кВт/кВАр. За наявності синхронних двигунів оцінюється їх доцільність у процесі компенсації реактивної потужності. Центрالیзована система моніторить кількість СД, температуру охолоджуючого повітря, температуру обмоток статора і ротора, а також живильну напругу, не допускаючи перевищення граничних значень цих параметрів. Зібрані дані використовуються для оптимального регулювання СД, що забезпечує рівномірне завантаження по відносній повній потужності кожного двигуна [10]. В результаті такого контролю загальне балансне значення $Q_{\text{з.б.}}$ (МВАр·год) в ідеалі повинно дорівнювати нулю, що означає те, що система не генерує та не споживає реактивну потужність з мережі.

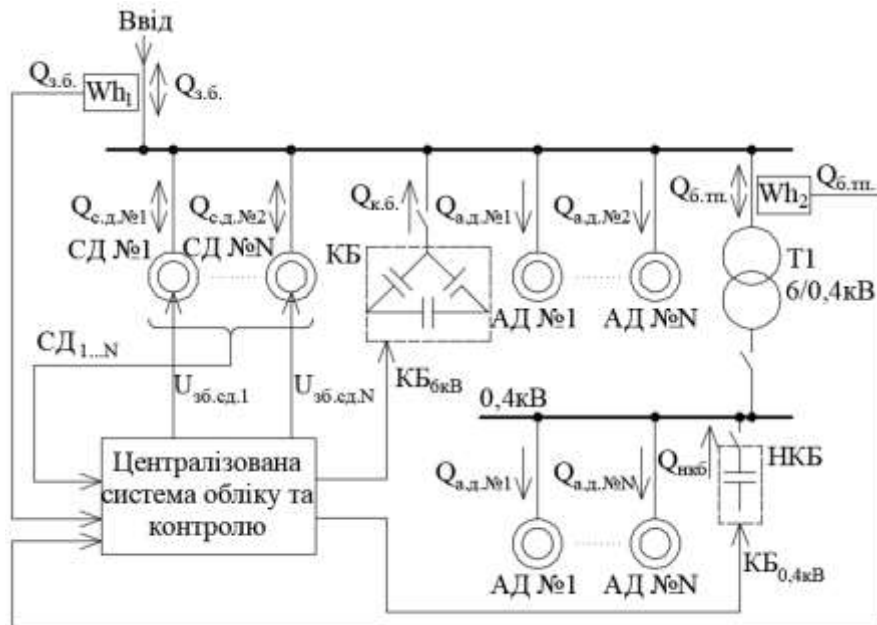
Інтеграція автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП) у електроенергетичну систему є ключовим елементом для забезпечення безперебійного та ефективного функціонування споживачами промислових об'єктів. Кіберфізичні системи (КФС) поєднують комп'ютерні алгоритми з фізичними процесами. Зокрема, на підстанціях ці системи виконують моніторинг, управління, аналіз і оптимізацію роботи електрообладнання, що дає змогу своєчасно виявляти й запобігати можливим збоям, а також прогнозувати стан обладнання. Тому доцільно розглядати систему з точки зору КФС.

Попри наведені плюси, така система має певні недоліки: наявність дорогого сучасного обладнання та складного налаштування алгоритмів керування компенсуючими пристроями. Високовартісне обладнання може бути економічно обґрунтованим за рахунок скорочення періоду окупності, проте це потребує подальших досліджень. Складні алгоритми можна значно спростити, зберігши точність та швидкодію за допомогою, наприклад використання нечіткої логіки у централізованій системі обліку та контролю [11]. Враховуючи вказані умови, можна скласти граф даної системи, що зображено на рис. 3. Даний граф відображає ланки перетікання реактивної потужності, її моніторингу та контролю.

В табл. 1 представлена матриця суміжності такого графа.

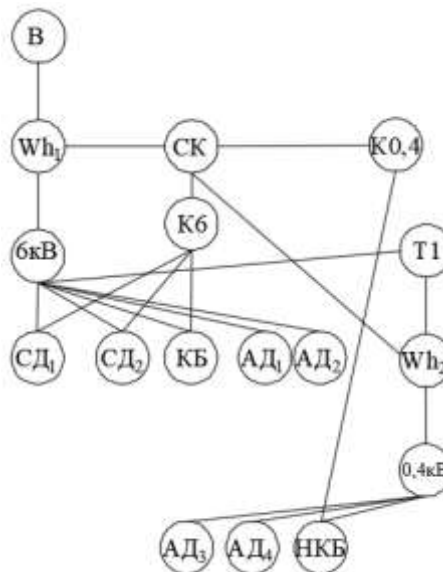
Аналітично, результуючу матрицю інцидентності $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$ (де $i, j = 1, \dots, 17$ – номери блоків; $\lambda_{ij} = 1$, якщо i -й блок є початком ребра, закінченням якого є блок j ; $\lambda_{ij} = 0$, якщо $i = j$ або i -й блок не є початком ребра, закінченням котрого є блок j ; номери строк відповідають позначенню симплексів) сформовано в табл. 2.

Отримані матриця суміжності та матриця інцидентності є невід'ємними компонентами топологічного аналізу структури підстанції. Симпліціальний аналіз застосовує ці матриці для створення симпліціальних комплексів — впорядкованих наборів симплексів. Ці комплекси слугують основою для дослідження топологічних характеристик мережі та оцінки змін її структури при варіюванні параметрів вузлів або зв'язків.



$Q_{з.б.}$ - загальний баланс РП; $Q_{с.д.№1} \dots Q_{с.д.№N}$ - споживання (генерація) РП синхронними двигунами; $Q_{к.б.}$ - генерація РП конденсаторними батареями 6кВ; $Q_{а.д.№1} \dots Q_{а.д.№N}$ - споживання РП асинхронними двигунами; $Q_{б.тп.}$ - баланс РП 0,4кВ; $Q_{нкб.}$ - генерація РП конденсаторними батареями 0,4кВ; $СД_{1...N}$ - дані про технологічні параметри синхронних двигунів; $U_{зб.сд.1} \dots U_{зб.сд.N}$ - напруга збудження синхронних двигунів; $КБ_{0,4кВ}$ ($КБ_{6кВ}$) - контроль ступенів конденсаторних батарей.

Рисунок 2 – Централізована система обліку та контролю перетоків реактивної потужності



$В$ - ввід; Wh_1, Wh_2 - лічильники; $6кВ$ - шини 6кВ; $СК$ - система контролю; $К6$ - контроль компенсаторів 6кВ; $К0,4$ - контроль компенсаторів 0,4кВ; $КБ$ - конденсаторні батареї; $АД_1, АД_2, АД_3, АД_4$ - асинхронні двигуни; $Т1$ - трансформатор 6/0,4кВ; $НКБ$ - низьковольтні конденсаторні батареї; $СД_1, СД_2$ - синхронні двигуни; .

Рисунок 3 – Граф підстанції та системи контролю перетіканням реактивної потужності

Для системного дослідження та виявлення спільності завдань управління окремими стадіями збагачення застосуємо технологічну схему і методологію декомпозиції. Важливими залишаються питання достовірності результатів та ідентифікації ключових концептів і зв'язків системи. Для вирішення цих питань доцільно використати симпліціальний аналіз, який застосуємо для структури моделі підстанції гірничозбагачувального комбінату.

Таблиця 1 – матриця суміжності графа підстанції та системи контролю перетіканням реактивної потужності

	В	Wh1	6кВ	СД ₁	СД ₂	СК	К6	КБ	АД ₁	АД ₂	К0,4	Т1	Wh ₂	0,4кВ	АД ₃	АД ₄	НКБ
В	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wh1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6кВ	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
СД ₁	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СД ₂	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СК	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
К6	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
КБ	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
АД ₁	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
АД ₂	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
К0,4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Т1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Wh ₂	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0,4кВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
АД ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
АД ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
НКБ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0

Таблиця 2 – матриця інцидентності графа підстанції та системи контролю перетоками реактивної потужності

	В	Wh1	6кВ	СД ₁	СД ₂	СК	К6	КБ	АД ₁	АД ₂	К0,4	Т1	Wh ₂	0,4кВ	АД ₃	АД ₄	НКБ
(В,Wh ₁)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Wh ₁ ,6кВ)	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Wh ₁ ,СК)	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,СД ₁)	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,СД ₂)	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,КБ)	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,АД ₁)	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,АД ₂)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
(6кВ,Т1)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
(СК,К6)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(СК,Wh ₂)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
(СК,К0,4)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
(К0,4,НКБ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
(К6, СД ₁)	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(К6, СД ₂)	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(К6,КБ)	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Т1,Wh ₂)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
(Wh ₂ ,0,4кВ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
(0,4кВ,АД ₃)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
(0,4кВ,АД ₄)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
(0,4кВ,НКБ)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

На основі показника $R_K \in \mathfrak{R}$ оцінюється структурна збитковість матриці Λ :

$$R_K = \left[\sum_{i=1}^{17} \sum_{j=1}^{21} \lambda_{ij} \right] \frac{1}{16} - 1 = \frac{42}{16} - 1 \approx 1,625. \quad (2)$$

Оскільки $R_k=1,69>0$, то система є зв'язною (без обривів) та має збитковість (тобто потенційно надійна). Різні значення максимальних розмірностей симплексів формально відображаються в показнику $\varepsilon \in \mathcal{R}$ рівномірного розподілу зв'язків орієнтованого графу, що має $m_1 \in \mathcal{Z}$ ребер та $m_2 \in \mathcal{Z}$ вершин:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{m_2} (\rho_i - \rho_c)^2 = \sum_{i=1}^{m_2} \left(\rho_i - \frac{m_1}{m_2} \right)^2, \quad (3)$$

де $\rho_{aver} \in \mathcal{R}$ – середня ступінь вершини; $\rho_i \in \mathcal{Z}$ – дійсна ступінь i -ї вершини.

З урахуванням даної залежності в умовах нашої моделі, отримуємо $\varepsilon=3,69$. Результат $R_k>0$ показує, що топологічна структура запропонованої централізованої системи керування перетіканням реактивної потужності наближається до повного графа, але при $\varepsilon \neq 0$ це не є явно вираженим показником.

Така структура повністю відповідає загальноприйнятій в цей час концепції автоматизації промислових виробництв та відомим актуальним стандартам [12]. Таким чином, на основі виконаного аналізу можливо створити модель та дослідити енергоефективність запропонованої системи.

Враховавши усі вищезгадані особливості, було створено модель у середовищі Simulink програмного забезпечення Matlab (версія 2017a). Дана модель зображена на рис. 4.

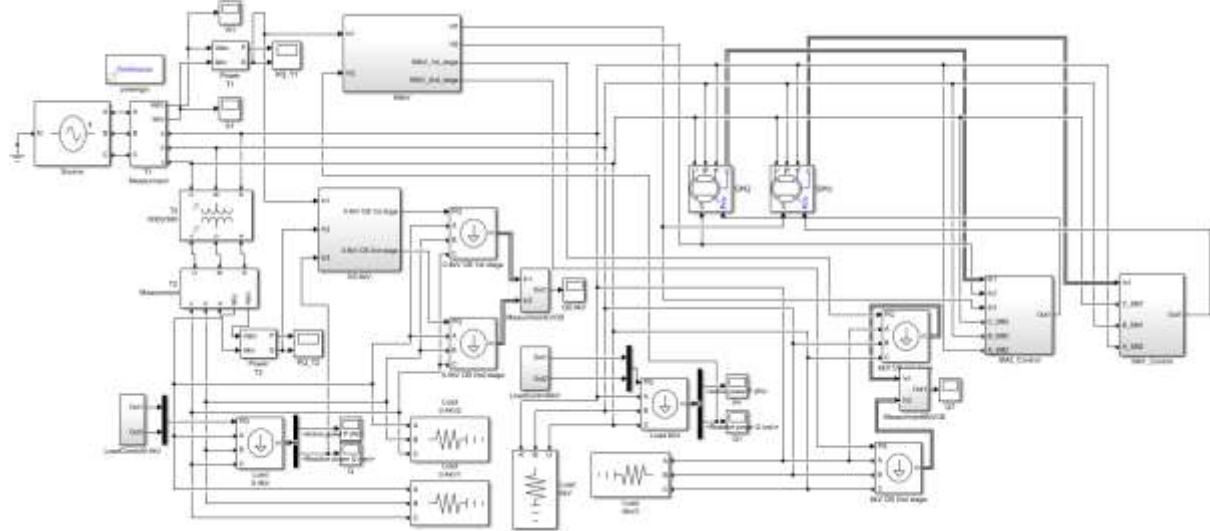


Рисунок 4 – Модель централізованої системи обліку та контролю перетіканням реактивної потужності у Simulink

Як приклад, на рис. 5 (а, б) зображені графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації (пунктиром показана активна потужність, суцільною лінією – реактивна потужність). Дані взяті з лічильника Power T1 (на вході). Як можна побачити на рис. 5 (б), централізована система обліку та контролю перетіканням реактивної потужності ефективно знижує споживання РП.

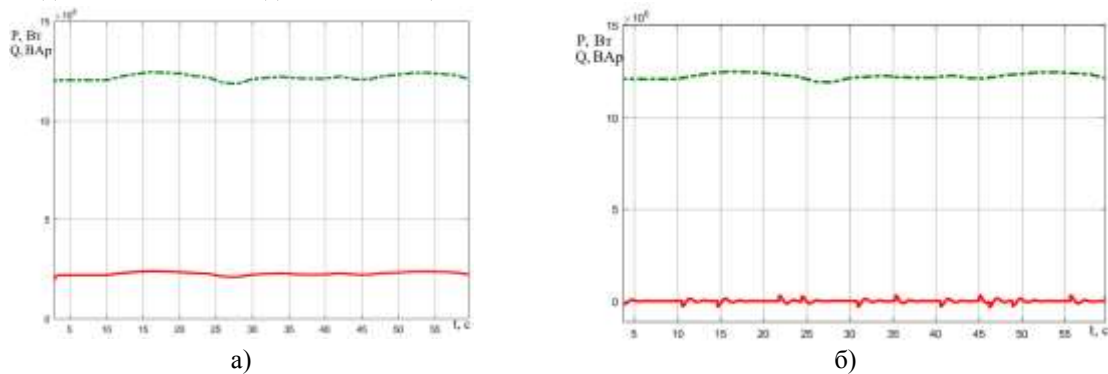
Проте повністю забезпечити «нуль-перетікання» майже неможливо, оскільки в системі наявні 2 потужні СД ($P_n=1250$ кВт кожен) та по 2 ступені конденсаторних установок для 6кВ та 0,4кВ. В даному випадку важливо враховувати перехідні процеси. По-перше, вони залежать від параметрів самого синхронного двигуна, таких як його ємність, опір та індуктивність. Ці параметри впливають на час реакції двигуна на зміни навантаження та на ефективність компенсації реактивної потужності. По-друге, перехідні процеси залежать від властивостей конденсаторних установок, таких як їх ємність, напруга та частота. Ці параметри впливають на ефективність компенсації реактивної потужності та на стабільність роботи мережі [13]. В реальних системах додатково буде впливати й характеристики комутаційної апаратури (час перемикання, опір, тощо). Таким чином, аналіз перехідних процесів у таких системах є перспективним для подальших досліджень.

Додатково при залученні у компенсацію СД та КУ спостерігається відносно незначне підвищення споживання активної потужності (приблизно 0,34%). Проте в такому випадку додаткова сплата за активну потужність буде приблизно в 3,7 рази менша, ніж за РП до впровадження заходів з компенсації. Варто зазначити, що термін окупності та реальний економічний ефект буде залежати від багатьох чинників (спосіб реалізації, наявність чи відсутність СД та КУ, тощо), тому його варто розраховувати в індивідуальному порядку.

Висновки.

В результаті дослідження встановлено, що централізована система обліку та керування реактивною потужністю на основі інтелектуальних систем дозволяє раціонально використовувати компенсуючі

пристрої. При цьому КБ та СД використовуються адаптивно, в залежності від їх технологічних параметрів та необхідного значення РП для компенсації.



а) - Споживання електричної енергії без компенсації; б) - Споживання електричної енергії з централізованою системою обліку та контролю перетікання реактивної потужності.

Рисунок 5 – Графіки споживання електричної енергії при наявності та відсутності пристроїв компенсації

У результаті система забезпечує максимально приближене до нульового значення споживання РП з мережі, значно знижуючи сплату підприємством за електричну енергію. Таким чином, інтеграція централізованої системи керування з іншими елементами енергетичного менеджменту підприємства дозволяє не лише знижувати втрати, а й оптимізувати загальну електроенергетичну структуру, підвищуючи стабільність та надійність електропостачання.

Список використаної літератури

1. Salim Adolfo G.Y., Vladimir S.S., Kelly B.S., John E. Candelo-Becerra, Jorge de la Cruz Comprasion of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // *Electricity*, 2024. vol. 5, issue 3. PP. 642-661. DOI:10.3390/electricity5030032.
2. Lionginas L. The methods of reactive power compensation in the 25kV, 50Hz contact network // *Transport Problems*, 2018. vol. 13, issue 5. PP. 59-68. DOI:10.21307/tp.2018.13.1.6.
3. Alireza A., Hossein H. An improved centralized/decentralized accurate reactive power sharing methond in AC mircogrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023. vol. 148. 108908. DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Guo-Feng Fan, Yan-Rong Liu, Hui-Zhen Wei, Yu M., Yin-He Li The new hybrid approaches to forecasting short-term electricity load, *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 213, 108759. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108759>.
5. Wang Z., Yao D., Shi Y., Fan Z., Liang Y., Wang Y., Li H. A two-stage electricity consumption forecasting method integrated hybrid algorithms and multiple factors, *Electric Power Systems Research*, 2024, vol. 234, 110600. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110600>.
6. Gholami M., Gholami A., Mohammadtaheri M. Cyber-physical power system reliability assessment considering multi-state independent components, *Electric Power Systems Research*, vol. 217 (2023) 109141. doi:10.1016/j.epsr.2023.109141.
7. Wang X., McArthur S., Strachan S., Kirkwood J.D. A Data Analytic Approach to Automatic Fault Diagnosis and Prognosis for Distribution Automation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017 1-9. doi:10.1109/TSG.2017.2707107.
8. Xiang Y., Wang L., Zhang Y. Adequacy evaluation of electric power grids considering substation cyber vulnerabilities, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96 (2018) 368-379. doi:10.1016/j.ijepes.2017.10.004.
9. Осадчук Ю.Г., Учитель А.Д., Жуков С.А. та ін. Підвищення енергетичної ефективності потужних електроприводів турбомеханізмів гірничо-металургійних комплексів. Монографія. – Кривий Ріг: Редакційно-видавничий центр ГВУЗ «КНУ», 2018. – 345с. ISBN 978-966-132-050-4
10. Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 157230 Україна: МПК H02J 3/18; заявл. 14.03.2024; опубл. 18.09.2024, Бюл. №38. 6 с.
11. A. Kupin, Y. Sherstnov, Y. Osadchuk, O. Savytskyi, Intellegent Control of Industrial Compensating Devices Based on the Application of Fuzzy Logic, *CEUR Workshop Proceedings*, 3403. pp. 218-230.
12. ДСТУ EN 62264-1:2019. Інтегрування систем керування підприємством та виробництвом. Частина 1. Моделі та термінологія. [Чинний від 2019-09-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 77 с.
13. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910

REACTIVE POWER CONTROL BASED ON A CYBER-PHYSICAL MODEL OF A MINING AND PROCESSING PLANT SUBSTATION

The article presents the results of modeling a centralized reactive power compensation system of a mining and processing enterprise based on a cyber-physical model in the context of effective energy consumption management. Daily and annual data on the volume of electricity consumption by consumers of the enterprise's substations are analyzed. An innovative approach to monitoring and optimizing energy flows is proposed, aimed at reducing losses and improving energy efficiency. Optimal conditions for using synchronous motors and capacitor banks are established. The model is based on the integration of modern monitoring and data analysis technologies, which allows adapting to dynamic load changes and promptly adjusting the parameters of the compensation system. The study assesses the impact of the developed methods on the stability of the enterprise's power system and the economic component of implementing the proposed solutions. The results obtained show the prospects of the proposed solutions for reactive power compensation to increase the energy efficiency of production.

Keywords: mining and processing plants, energy efficiency, capacitor banks, synchronous motors, reactive power, active power.

References

1. Salim Adolfo G.Y., Vladimir S.S., Kelly B.S., John E. Candelo-Becerra, Jorge de la Cruz Comprasion of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems // *Electricity*, 2024. vol. 5, issue 3. PP. 642-661. DOI:10.3390/electricity5030032.
2. Lionginas L. The methods of reactive power compensation in the 25kV, 50Hz contact network // *Transport Problems*, 2018. vol. 13, issue 5. PP. 59-68. DOI:10.21307/tp.2018.13.1.6.
3. Alireza A., Hossein H. An improved centralized/decentralized accurate reactive power sharing method in AC microgrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023. vol. 148. 108908. DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108908.
4. Guo-Feng Fan, Yan-Rong Liu, Hui-Zhen Wei, Yu M., Yin-He Li The new hybrid approaches to forecasting short-term electricity load, *Electric Power Systems Research*, 2022, vol. 213, 108759. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108759>.
5. Wang Z., Yao D., Shi Y., Fan Z., Liang Y., Wang Y., Li H. A two-stage electricity consumption forecasting method integrated hybrid algorithms and multiple factors, *Electric Power Systems Research*, 2024, vol. 234, 110600. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110600>.
6. Gholami M., Gholami A., Mohammadtaheri M. Cyber-physical power system reliability assessment considering multi-state independent components, *Electric Power Systems Research*, vol. 217 (2023) 109141. doi:10.1016/j.epsr.2023.109141.
7. Wang X., McArthur S., Strachan S., Kirkwood J.D. A Data Analytic Approach to Automatic Fault Diagnosis and Prognosis for Distribution Automation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017 1-9. doi:10.1109/TSG.2017.2707107.
8. Xiang Y., Wang L., Zhang Y. Adequacy evaluation of electric power grids considering substation cyber vulnerabilities, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 96 (2018) 368-379. doi:10.1016/j.ijepes.2017.10.004.
9. Osadchuk Y.G., Uchitel A.D., Zhukov S.A. and others. Increasing the energy efficiency of powerful electric drives of turbomechanisms of mining and metallurgical complexes. Monograph. – Kryvyi Rih: Editorial and Publishing Center of the State University of Mining and Metallurgy “KNU”, 2018. – 345p. ISBN 978-966-132-050-4
10. Method for increasing the energy efficiency of technical systems of technological units with synchronous drives: pat. 157230 Ukraine: MPK H02J 3/18; appl. 03/14/2024; publ. 09/18/2024, Bull. No. 38. 6 p.
11. A. Kupin, Y. Sherstnov, Y. Osadchuk, O. Savytskyi, Intelligent Control of Industrial Compensating Devices Based on the Application of Fuzzy Logic, *CEUR Workshop Proceedings*, 3403. pp. 218-230.
12. DSTU EN 62264-1:2019. Integration of enterprise and production control systems. Part 1. Models and terminology. [Valid from 2019-09-01]. Official edition. Kyiv: State Enterprise "UkrNDNTs", 2019. 77 p.
13. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. Reactive power compensation for reliability improvement of power systems. 2016 DOI: 10.1109/TDC.2016.7519910

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025

Н. Філімоненко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1867-3812К. Філімоненко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9264-4767Н. Смиринська², начальник відділу, ORCID 0000-0001-5373-2625В. Левандовський², конструктор, розробник, ORCID 0000-0003-0033-0694Б. Якутович³, директор¹Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля²Національний університет "Одеська Морська Академія"³ТОВ «Філіт-глобал»

ВИПРОБУВАЛЬНИЙ СТЕНД СПРОЩЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІАЛЬНИХ РІВНЕЙ УРАЖЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ВПЛИВІ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ

В статті розглядається вдосконалення засобів експериментального дослідження в польових умовах стійкості до потужного електромагнітного імпульсу радіоелектронної апаратури виконаної на базі COTS-технології, зокрема в наносекундному діапазоні тривалості імпульсу. Запропоновано варіант випробувального стенду для орієнтовного визначення критеріальних рівней ураження радіо-електронних компонентів при впливі потужних імпульсів електромагнітної енергії.

Ключові слова: радіоелектронні засоби (РЕЗ), потужне електромагнітне випромінювання (ПЕМВ), потужний електромагнітний імпульс (ПЕМІ), COTS-технології, надвисокочастотне випромінювання (НВЧ).

Швидкий розвиток безпілотних транспортних засобів, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних та надводних безпілотних апаратів спричинив не менш швидке зростання кількості підприємств в цій галузі, зокрема в секторі малого та середнього бізнесу. На початку 2024 року у цій галузі в Україні працюють більше 400 підприємств [1].

Швидкими темпами також розвивається перспективний сектор видобутку екологічно чистої вітрової електроенергії, з вітроелектростанцій розміщених в верхніх шарах тропосфери [2]. Для чого використовується безпроводна передача електроенергії за допомогою надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання [3]. В березні 2014 р. компанія Altaeros Energies запустила перший в світі літаючий вітрогенератор Buoyant Airborne Turbine Рис.1 [4].



Рисунок 1 - Вітрогенератор Buoyant Airborne Turbine[4]

Сьогодні людська цивілізація споживає близько $18 \cdot 10^{12}$ Вт електроенергії. Як відомо, потенціал енергії вітру біля Землі становить $400 \cdot 10^{12}$ Вт. При цьому енергія вітру в тропосфері оцінюється в $1,8 \cdot 10^{15}$ Вт [2]. Більш того цілком реальним стає впровадження космічної сонячної енергетики з використанням безпроводної передачі електроенергії за допомогою надвисокочастотного випромінювання (НВЧ) [5].

Постановка проблеми

Безпроводна передача електроенергії в повітряному просторі неминуче впливає на радіоелектронні засоби (РЕЗ) літальних апаратів (ЛА), БПЛА, та наземних безпілотних транспортних засобів, що може призвести до пошкодження, або критичного збою радіоелектронних компонентів цих РЕЗ. Оскільки більшість вказаних технічних засобів використовують елементну базу на COTS-технологіях (Commercial off-the-shelf) вірогідність пошкодження, або критичного збою в роботі РЕЗ тільки збільшується. Цілком очевидно, що технології безпроводної передачі електроенергії в повітряному просторі, та технології безпілотних транспортних засобів вже перешкоджають одна одній.

Більше того нещодавно стало відомо, що «Ініціатива сталого розвитку» Ісландії Transition Labs яка розробляє з британською Space Solar та ісландською енергетичною компанією Reykjavik Energy сонячну електростанцію, розташовану за межами атмосфери – на орбіті Землі. Перша установка Space Solar яка має початкову потужність 30 МВт [3]. Сонячна електростанція потужністю 30 МВт буде виведена на орбіту за один запуск за допомогою ракети Starship (SpaceX). Таким чином проблема електромагнітної сумісності безпроводної передачі електроенергії в повітряному просторі та нормального функціонування безпілотних транспортних засобів стає критично актуальною вже в найближчій перспективі [3].

Внаслідок цього в сучасних умовах виробники РЕЗ багато зусиль приділяють розробці методів (способів), а на їх основі створенню приладів захисту РЕЗ від впливу потужних зовнішніх електромагнітних впливів. Зокрема, виробники, які використовують елементну базу на COTS-технологіях вже сьогодні стикаються з проблемою стійкості цієї елементної бази до дії потужного електромагнітного випромінювання (ПЕМВ), зокрема ПЕМІ.

В останній час з'явилося і продовжує з'являтися велика кількість розробок щодо створення електромагнітної зброї (ЕМЗ) [6-11]. Основним об'єктом її ураження є радіоелектронна апаратура, яка складає основу систем управління критичної цивільної інфраструктури та військової техніки, пунктів управління та інших важливих об'єктів військової і критичної цивільної інфраструктури. Цілком вірогідно потрапляння окремих зразків електромагнітної зброї до рук терористичних угруповань. Це вимагає від виробників безпілотних транспортних систем враховувати таку вірогідність.

Відомо два основні фізичних механізми незворотних відмов РЕЗ – електричний пробій та тепловий пробій напівпровідникових структур, що входять до складу елемента РЕЗ [6-7] під дією імпульсів струму та напруги, що наводяться на зовнішній частини електродів елементів під дією електричної та магнітної складових ПЕМІ.

Вплив на РЕЗ потужного електромагнітного випромінювання здійснюється як безпосередньо, так і у якості імпульсних напруг та струмів, які наводяться ПЕМІ в антено-хвиеводних пристроях і лініях зв'язку, що прямують у підсумку на чутливі елементи входів РЕЗ. Основні напрями впливу ПЕМІ – «пряме», через антено-хвиеводний тракт і «зворотній» через отвори та щілини в захисному екрані РЕЗ [6]. Стійкість сучасних РЕЗ до впливу ЕМЗ можливо визначити двома показниками: стійкістю різноманітних елементів до впливу електричних і магнітних полів та стійкістю до імпульсних струмів і напруги, що наводяться. ПЕМІ здатен призвести до деградаційних ефектів у чутливих елементах РЕЗ. Ступінь і характер деградацій, що виникають, визначається на базі існуючих теплових та термоелектричних моделей оцінки електромагнітної стійкості РЕЗ до впливу ПЕМІ, найбільш відомими з яких є класична теплова модель Вунша- Белла (W - V), моделі Таска, ААГР, об'ємна теплова модель Двасра-Франкліна-Кемпбелла, модель пошкодження розшарованих структур. Умови застосування кожної з моделей визначаються характеристиками ПЕМІ, генерованого ПЕМВ, і параметрами об'єкта, що піддається впливу [7, 8, 11].

Параметри чутливості елементної бази РЕЗ при впливі ПЕМІ вказані у [6, 8, 11]. Рівні критичної енергії та механізми функціонального ураження різноманітних елементів сучасних РЕЗ неоднакові. В [6, 8, 11] наведено значення критичної та порогової енергії. Але проблемними питаннями на сьогодні є відсутність єдиної бази даних про критеріальні рівні ураження ПЕМІ як окремих радіоелектронних компонентів, так і зразків безпілотних систем.

Критеріальні рівні ураження РЕЗ при впливі ПЕМІ наведені в джерелі [11] визначені за допомогою методик наведених в [12]. Наприклад, орієнтовний рівень ураження НВЧ-діода в [11] становить 10^{-8} Дж в умовах ПЕМІ тривалістю $30 \cdot 10^{-6}$ секунд що цілком може призвести до хибної оцінки стійкості РЕЗ в умовах ПЕМІ тривалістю $10\text{-}30 \cdot 10^{-9}$ секунд.

Таким чином, на сьогодні відсутні універсальні методики та підходи, щодо визначення критеріальних рівней ураження радіоелектронних компонентів під час впливу ПЕМІ на існуючі та перспективні безпілотні транспортні засоби в різноманітних умовах експлуатації цих засобів.

Аналіз останніх публікацій за проблематикою

В Україні діє низка нормативних документів, які регламентують захист, та випробування РЕЗ та її елементної бази при впливі ПЕМВ, а саме: ДСТУ 3681-98 «Стійкість до дії грозових розрядів» [12], МЭК 801/1000—4, ... [13], ГОСТ 29156-91 «Устойчивость к наносекундным импульсным помехам, Технические

требования и методы испытаний» [14], міжнародний стандарт IEC 61000-4-4 «Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test» [15].

Методи випробувань які викладені в зазначених міжнародних нормативних документах недосконалі. Наприклад, відомі помилки при проектуванні радіоелектронних засобів сучасних літальних апаратів, зокрема винищувачів F-35A. Експлуатація радіоелектронних засобів цих літаків виявила їх вразливість від потужного електромагнітного випромінювання. В результаті експлуатація цих літаків заборонена на відстані до 40 км від грозових фронтів [16].

Треба відзначити, що реальні експериментальні роботи у галузі визначення критеріальних рівней ураження РЕЗ виконувалися у 70-ті роки на тогочасній елементній базі і можуть бути використані до сучасної елементної бази лише з певними застереженнями. Наприклад в джерелах [56], [11], [21] по суті є тільки посилання на експериментальні роботи виконані в мікросекундному діапазоні тривалості імпульсу по скасованому нині ГОСТ 30374-95.

Метою цієї роботи – є дослідження технічної можливості впровадження на малих і середніх підприємствах – виробниках безпілотних транспортних засобів нескладних та недорогих стендів для орієнтовного визначення критеріальних рівней ураження РЕЗ при впливі ПЕМІ в реальних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Відповідно до нормативних документів [12-14] виробник повинен виконувати перевірку РЕЗ та їх елементної бази виключно на базі сертифікованих лабораторних центрів, що є майже неможливим для більшості дрібних виробників, та представників середньої ланки цієї галузі. Частотний діапазон вказаний у нормативних документах [12-14] обмежений частотою 18 ГГц, хоча ще з 60-х років минулого століття активно використовується діапазон «вікна прозорості» 34-40 ГГц. Наприклад, для перевірки РЕЗ за вимогами ДСТУ 3681-98 використовуються вибухомагнітні генератори (ВМГ), в умовах спеціалізованої лабораторії.

Наприклад, фахівці Одеської Морської Академії ВМСУ виконували серії експериментів з ВМГ використовуючи високовольтний генератор NSG 3060, фірми TESEQ (Швейцарія) для перевірки ліній електроживлення на електромагнітну стійкість [16]. Схему експеримента зображено на Рис.2.

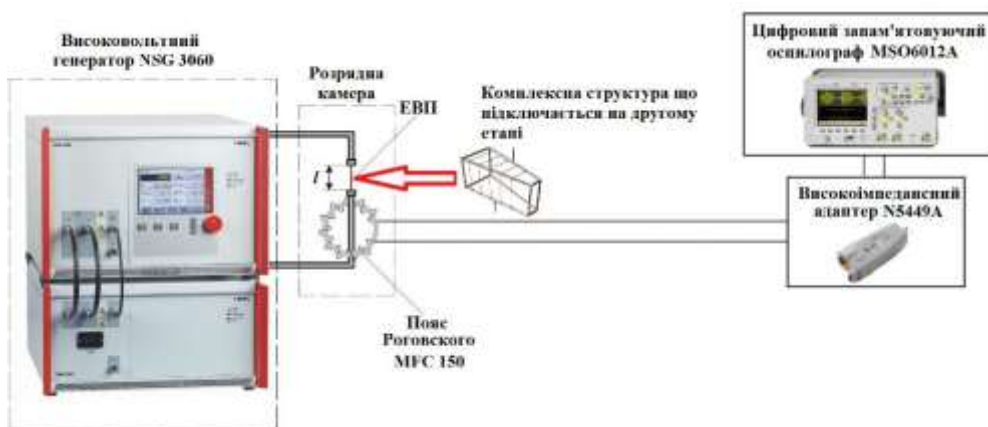


Рисунок 2 - Схема експериментальних досліджень з ВМГ і високовольтним генератором NSG 3060 [16]

Треба відзначити, що в Україні існує спеціалізований дослідницький центр - Експериментальна база дослідно-випробувального полігону Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія» Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут” [17]. Цей полігон займає площу 270000 м². Розміри дослідницьких стендів цього полігону продемонстровано на Рис.3. Просте підтримання в робочому стані цього дослідницького центру вимагає великих коштів.

На жаль, обладнання цього дослідницького центру дещо застаріло і не дозволяє виконувати досліді складних технічних зразків у відповідності до вимог сучасних нормативних документів [17]. Зауважимо що метою цього дослідницького центру було створення специфічного імітатора електромагнітного імпульсу ядерного вибуху. Крім того цей дослідницький центр, певний час був окупований військами Російської Федерації, зараз знаходиться у зоні бойових дій. У відкритому доступі відсутня інформація щодо доступності вказаного дослідницького центру для використання приватними виробниками РЕЗ.

Треба відзначити що приватні виробники в розвинутих країнах будують такі випробувальні центри за власні кошти, або за підтримки держави, наприклад випробувальний центр фірми SAAB (Швеція), метою якого була власне не імітація ПЕМІ ядерного вибуху, а вплив мікросекундних і наносекундних ПЕМІ в НВЧ-діапазоні [19]. Наскільки потужним може бути такий вплив ПЕМІ на елементи РЕЗ наочно ілюструє зображення з публікації [19] Рис.4, Рис.4а.



Рисунок 3



Рисунок 4 - Шведський НВЧ-тестовий стенд [19]



Рисунок 4а - Пошкодження транзистора [19]

Для перевірки РЕЗ в умовах польових випробувань автори пропонують нескладний у виготовленні стенд з НВЧ генератором наносекундних ПЕМІ на базі серійного імпульсного магнетронного генератора, наприклад МІ-241 (МІ-514 частота 14570-15420 МГц, потужність 150 кВт) з пристроєм часової компресії, стисненням мікрохвильового імпульсу до тривалості $10\text{-}30 \cdot 10^{-9}$ сек, потужністю 1-1,5 МВт.

Стиснення мікрохвильового імпульсу — загалом це перетворення довготривалого імпульсу мікрохвильової потужності в імпульс з меншою тривалістю і більшою амплітудою. Опис вказаної методики стиснення імпульсу наведено в джерелах [20, 21, 22]. Схематично будову випробувального стенду показано на Рис.5. Стенд містить джерело живлення магнетронів (на схемі умовно не показано), магнетрони - 1, хвилеводи - 2, обертові зчленування хвилеводів - 3, компресор стиснення мікрохвильового імпульсу - 4, лінзову (параболічну) антену - 5, цапфи кріплення антени до лабораторного штатива (тримача) - 6. Будова компресора імпульсів на довжині хвиль 22 мм (МІ-241 - частота $\sim 13,64$ ГГц) в цілому відповідає конструкції наведених в [20] і показана на Рис.5а.

За підрахунками авторів маса стенду не перевищує 8 кг, габарити складають 0,5х0,5х0,8 м (без джерела первинного – потужністю до 15 кВт, та вторинного живлення потужністю до 10 кВт).

При використанні магнетронів IP Mag-457 (Рис.6, Рис.6а) компанії Insight Product Co, (США) [23] в діапазоні 34-38 ГГц і компресора стиснення мікрохвильового імпульсу цілком можливо отримати імпульсну потужність на рівні 10-15 МВт, що дає можливість проводити випробування РЕЗ в польових умовах. Фактично ці пристрої є продукцією ВАТ «Плутон» м. Москва, тому автори пропонують використати більш доступну альтернативу – магнетрон МІ-514М потужністю 150 кВт.

Висновки:

1. Показана можливість побудови компактного, нескладного стенду для випробувань РЕЗ виконаних на СOTS-технологіях на стійкість до ПЕМІ в наносекундному діапазоні тривалості імпульсу,
2. Використання магнетронів потужністю 150 кВт, та простого пристрою часової компресії, стисненням мікрохвильового імпульсу до тривалості $10\text{-}30 \cdot 10^{-9}$ сек, дає можливість забезпечити потужність НВЧ-випромінювання при випробовуваннях РЕЗ на рівні 1-1,5 МВт.

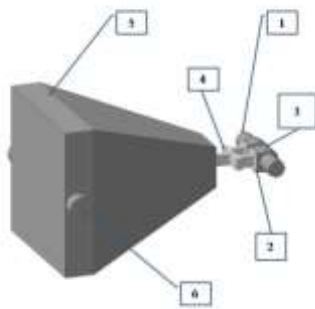


Рисунок 5

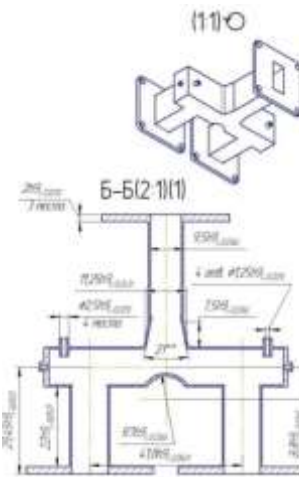


Рисунок 5а

3.



Рисунок 6 - магнетрон IP Mag-457 [23]

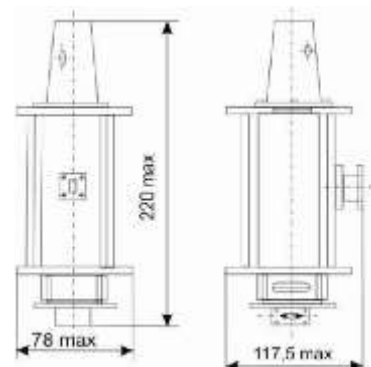


Рисунок 6а - магнетрон IP Mag-457 [23]

Список використаної літератури

1. <https://www.mil.gov.ua/news/2024/02/01/rustem-umerov-na-zustrichi-z-virobnikami-bpla/>;
2. 30 MW space solar plant designed to send electricity to Earth by 2030 <https://interestingengineering.com/energy/30-mw-space-solar-plant-designed-to-send-electricity-to-earth-by-2030> ;
3. https://www.meteo vesti-ru.translate.goog/news/63483645358-troposfera-darit-elektroenergiyu-chelovechestvu?_x_tr_sl=ru&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=sc&_x_tr_hist=true ;
4. Experiments with Alternating Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination, AIEE, Columbia College, N.Y., May 20, 1891 <http://www.tfcbooks.com/tesla/1891-05-20.htm>.
5. Altaeros Energies, Inc. – Buoyant Airborne Turbine (BAT) https://lynceans.org/wp-content/uploads/2024/11/Altaeros-Energies_BAT.pdf ;
6. <https://www.cnbc.com/2019/03/15/china-plans-a-solar-power-play-in-space-that-nasa-abandoned-long-ago.html>;
7. Критерии функционального поражения современных радиотехнических систем электромагнитным оружием, Кузнецов Д. В. Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) №4 (13), 2015;
8. Wunsch D.S, Bell R.R. Determination of threshold failure level of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Trans. on Nuclear Sci., Vol.15, N6, 1968.-p.244-259.;
9. Д.Б. Кучер, Л. В. Литвиненко, Н. Б. Смиринська, Модель накопичення пошкоджень інтегральними елементами інформаційних систем при поліімпульсному впливі наносекундної тривалості, Системи обробки інформації: збірник наукових праць / ХУПС ім. І. Кожедуба. – Харків, 2017. – №4(150). – С. 11 – 15 <https://doi.org/10.30748/soi.2017.150.02>.
10. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Thermal failure in semiconductor devices // Solid State Electronics.-1990.-Vol.33, p.553-560.
11. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Electromagnetic discharge thermal failure in semiconductor devices // IEEE Trans. on Electr. Dev. Vol.37, N11, 1990.- p.2381-2387.
12. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов; под. ред. А.И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 487 с.;

13. ДСТУ 3681-98 Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань;
14. ДСТУ EN 61000-4-24:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 4-24. Методи випробування та вимірювання. Методи випробування пристроїв захисту від електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху та інших кондуктивних збурень. Базова публікація ЕМС;
15. ДСТУ EN 61000-4-23:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 4-23. Методи випробування та вимірювання. Методи випробування пристроїв захисту від електромагнітного імпульсу висотного ядерного вибуху та інших випромінюваних збурень;
16. ДСТУ EN 61000-4-4:2019 Електромагнітна сумісність. Частина 4-4. Методи випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до електричних швидких перехідних процесів/пакетів імпульсів (EN 61000-4-4:2012, IDT; IEC 61000-4-4:2012, IDT);
17. Pentagon won't lift F-35A lightning restrictions after hardware and software fix Valerie Insinna on November 21, 2022 at 1:38 PM <https://breakingdefense.com/2022/11/pentagon-wont-lift-f-35a-lightning-restrictions-after-hardware-and-software-fix/> ;
18. Кравченко В.І. Випробувальний полігон НДПКИ «Молнія» для забезпечення стійкості об'єктів військової техніки від впливу вражаючих факторів природного та штучного походження. Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, 22-23 вересня 2015), відп. ред. В.С.Шовкалюк. – К.: ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2015. – С. 65-74;
19. Д. Б. Кучер, Л. В. Кучер, Н. Б. Смиринська, Г. В. Лишак Експериментальні дослідження комплексної структури електровибухаючих провідників Системи та технології, № 2 (60), 2020 2, с 5-32, <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2020.2-60.1>
20. Susceptibility of Electronic Systems to High-Power Microwaves: Summary of Test Experience Mats G. Bäckström, Member, IEEE, and Karl Gunnar Löfstrand, Senior Member, IEEE - IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 46, NO. 3, AUGUST 2004 https://www.researchgate.net/publication/3056672_Susceptibility_of_Electronic_Systems_to_High-Power_Microwaves_Summary_of_Test_Experience ;
21. Пристрій часової компресії імпульсів НВЧ-енергії, патент на винахід № 2472260C1 МПК H01P 7/00;
22. Микроволновый источник мультигигаватной пикової мощности на основе комбинации релятивистской лампы обратной волны и компрессора / В. Л. Братман, Г. Г. Денисов, Н. Г. Колганов, С. В. Мишакин, С. В. Самсонов, Д. Н. Соколов. // ЖТФ - 2011. - Т. 81, Вып. 2. - С. 113-117;
23. Microwave Pulse Compression Experiments At Low Power <https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/E02p3.pdf>.
24. Insight Product Co. pulse magnetrons, magnetrons, unilament magnetrons, <https://insight-product.com/products3.htm> ;

N. Filimonenko ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1867-3812

K. Filimonenko ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-9264-4767

N. Smirinska ², department head, ORCID 0000-0001-5373-2625

V. Levandovski ², designer, developer, ORCID 0000-0003-0033-0694

B. Yakutovich ³, director

¹Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

²Національний університет "Одеська Морська Академія"

³LLC "FILTIM GLOBAL"

A TEST STAND OF SIMPLIFIED DESIGN FOR DETERMINING THE CRITERION LEVELS OF DAMAGE TO RADIOELECTRONIC COMPONENTS WHEN EXPOSED TO POWERFUL PULSES OF ELECTROMAGNETIC ENERGY

This article examines how to improve experimental research for field conditions of resistance to a powerful electromagnetic pulse of radio-electronic equipment made on the basis of COTS technology, in particular in the nanosecond range of pulse duration. A test stand is proposed for tentatively determining the criterion levels of damage to radio-electronic components under the influence of powerful pulses of electromagnetic energy.

Keywords: radio electronic means (REZ), powerful electromagnetic radiation (PEMV), powerful electromagnetic pulse (PEMI), COTS technologies, microwave radiation (MHF).

Надійшла: 14.11.2024

Received: 14.11.2024

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАНОЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В КОНТЕКСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЕНЕРГОАУДИТУ

Обґрунтовано підходи до визначення структури реактивної потужності споживаної електроприводом насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання та надано рекомендації щодо їх застосування при проведенні енергоаудиту для розробки заходів щодо підвищення їх коефіцієнта потужності. Визначено метод для розрахунку реактивної енергії споживаної як перетворювачем частоти, так і приводним асинхронним електродвигуном. Встановлено залежність реактивної потужності споживаної електродвигуном від його моменту та залежність реактивної потужності споживану перетворювачем частоти від потужності електродвигуна та його моменту. Ці залежності встановлено для режиму пропорційного керування $u/f=\text{const}$. Результати доводять що основна частка споживаної реактивної потужності припадає на електродвигун і залежить від режимів його роботи, в основному від величини його навантаження. Реактивна потужність споживана перетворювачем частоти залежить від потужності та моменту приводного електродвигуна відповідно до режиму його роботи і складає незначну частку від загальної споживаної електроприводом реактивної потужності.

Запропонований підхід дозволяє енергоаудитору при проведенні енергоаудиту частотно регульованих електроприводів насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання попередньо по спрощеній процедурі оцінити обсяг споживаної електроприводом реактивної енергії та відповідність режимів роботи мережі централізованого теплопостачання технологічним вимогам.

Ключові слова: *реактивна потужність, електропривід насосних агрегатів, коефіцієнт потужності, перетворювач частоти, асинхронний електродвигун, закон пропорційного керування.*

Вступ. Серед споживачів електричної енергії переважають електроприводи різного призначення, що споживають значну частку виробленої енергії. Загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у складі електроприводів в Україні складає близько 45 млн. кВт[1]. Значна кількість електроприводів встановлена на устаткуванні, яке використовується на підприємствах різних галузей народного господарства України, в тому числі і на підприємствах комунальної теплоенергетики. Особлива увага при проведенні енергоаудиту підприємств комунальної теплоенергетики має бути приділена електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання. Це пов'язано з тим, що електроприводи насосних агрегатів найбільш енергоємні у цій галузі. Проблема загострюється тим що вони працюють в режимі змінного навантаження, яке залежить від термодинамічних та гідравлічних параметрів в мережі централізованого теплопостачання. Значний час робочого циклу вони працюють в режимі зниженого навантаження і у цьому випадку із зниженим коефіцієнтом корисної дії та зниженим коефіцієнтом потужності, що призводить до зниження енергоефективності електроприводу насосного агрегату загалом.

Питання енергоефективності електроприводу насосних агрегатів, розглядається в працях як зарубіжних, так і вітчизняних вчених, і вони стосуються здебільшого роботи насосних агрегатів в системах водопостачання. Зокрема, ці питання висвітлюються у роботі [2]. На практиці, більшу частину часу відцентрові насосні установки експлуатуються при низьких або середніх навантаженнях, що відбувається через зміну технологічних параметрів, при цьому насоси проектується таким чином, щоб задовольняти максимальні навантаження [3].

Що стосується висвітлення проблеми енергоефективності електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання, то огляд літературних джерел показує що дослідженню цієї проблеми не приділяється належної уваги. У публікації [4] розглядається питання модернізації електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання електродвигунами різних типів і класів енергоефективності при дросельному регулюванні продуктивності мережевого насоса. У публікації [5] ця проблема розглядається для частотно-регульованого електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання. У публікації [6] розглядається питання впливу

термодинамічних параметрів на енергоефективність електроприводів насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання.

У вище наведених публікаціях питання підвищення енергоефективності електроприводу насосних агрегатів розглядається в контексті споживаної активної потужності, що не в повному обсязі відображає суть проблеми споживаної з енергомережі потужності, оскільки реактивна потужність споживана електроприводами при знижених навантаженнях складає значну частку і не завжди при проведенні енергоаудиту адекватно оцінюється. Не вивченим залишається також питання споживання реактивної потужності структурними елементами електроприводу, а саме споживання реактивної потужності окремо перетворювачем частоти та окремо електродвигуном. Обґрунтування методики визначення структури споживання реактивної енергії може спростити її розрахунок та дати енергоаудитору можливість адекватно оцінити її споживання.

З огляду на вище наведене обґрунтування методики визначення структури споживання реактивної потужності споживаної електроприводами насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання та її використання при проведенні енергоаудиту, при розробці заходів щодо підвищення коефіцієнта потужності є важливим науковим та практичним завданням.

У даному дослідженні обґрунтовуються методичні підходи до визначення структури реактивної потужності споживаної електроприводами насосних агрегатів та надаються рекомендації щодо їх застосування при енергоаудиті для розробки заходів щодо підвищення коефіцієнта їх потужності. Особливістю даної роботи є те, що споживана реактивна потужність визначається окремо для основних структурних елементів електроприводу; для перетворювачів частоти та електродвигунів.

Мета та завдання. Метою даної роботи є: теоретично обґрунтувати підходи до визначення структури споживаної реактивної потужності електроприводами насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання при проведенні енергоаудиту для розробки заходів щодо підвищення коефіцієнта їх потужності та енергоефективності загалом.

Матеріал і результати досліджень. Частотно регульований електропривід на базі асинхронного електродвигуна з короткзамкненим ротором є споживачем як активної так і реактивної енергії. Для повноти оцінки його властивостей як споживача електричної енергії в уставленому режимі роботи частотно-регульованого електроприводу, розглянемо споживану ним з мережі реактивну потужність. Для розрахунку реактивної потужності на вході частотного перетворювача скористаємося формулами його мережових характеристик, отриманих у припущенні відсутності вищих гармонік у кривих струмів та напруг перетворювача, електричних втрат у вентилях випрямляча та напівпровідникових ключах автономного інвертора напруги, а також втрат у сталі реакторів. При цих припущеннях реактивна потужність на вході частотного перетворювача визначається за формулою

$$Q = \frac{18}{\pi^2} \omega_0 \epsilon L_{p.vx} i_B^2 \quad (1)$$

Формула (1) показує, що реактивна потужність Q залежить від величини вихідного струму випрямляча i_B та індуктивного опору $X_{p.vx} = \omega_0 \epsilon L_{p.vx}$ комутувального реактора.

З огляду на те, що метою нашої роботи є визначення структури споживання реактивної енергії електроприводом насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання, ми будемо визначати реактивну енергію споживану як перетворювачем частоти, так і приводним двигуном.

Для цього розглянемо структуру частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату в мережі централізованого теплопостачання. На рис. 1 зображено структуру запропонованого нами насосного агрегату тепломережі системи централізованого теплопостачання. До складу насосного агрегату входить трифазний асинхронний електродвигун, що живиться через частотний перетворювач від електричної мережі, який приводить в рух відцентровий насос, що працює на гідравлічну систему тепломережі.



Рисунок 1 - Структура частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання.

В мережі встановлено насосний агрегат, де в якості насоса використовується відцентровий насос ЦН-400-105 [7]. Для приводу насоса використовується асинхронний двигун класу ефективності типу

МЗВР315MLA4 потужністю 200кВт та частотою обертання 1450 обертів на хвилину [8]. В структурі електроприводу застосовується частотний перетворювач АСН580-07-363А-4 потужністю 200 кВт., напругою 380 В., струмом 363 А., і частотою 0- 500 Гц. [9]. Обстеження запропонованої нами для дослідження реальної теплової мережі централізованого теплопостачання показали, що фактичні витрати та подача теплоносія складає 1063 м³/год., максимальна подача (витрата) теплоносія 1200 м³/год., перепад тиску на насосі 12/4.8 атмосфер.

При цьому для забезпечення режиму роботи має місце паралельна робота трьох насосних агрегатів. Гідравлічна потужність визначається витратою Q та напором насоса $H_{\text{нас}}$. Напір насоса залежить від витрати відповідно до характеристики $Q-H$ насоса при заданій частоті обертання насоса n . Отже, необхідна електрична потужність електроприводу P_1 залежить від витрати теплоносія Q та напору насоса H : $P_1 = \rho g Q H_{\text{нас}} + \Sigma P_{\text{втр.нас}} + \Sigma P_{\text{втр.дв}}$; де ρ – щільність теплоносія, g – прискорення вільного падіння [10].

Таким чином, для визначення споживання активної потужності електроприводом насосного агрегату необхідно розрахувати такі параметри, як напір та подачу теплоносія. За умови, що частота обертання насоса не регулюється, його продуктивність та напір змінюються дроселюванням, наслідком чого є значні втрати електроенергії в електроприводі. Зміна частоти обертання робочого колеса насоса призводить до зміни всіх його характеристик і, в першу чергу його продуктивності та напору. Перерахунок характеристик насоса на іншу частоту обертання здійснюється за допомогою формул приведення. Робота насосного агрегату розглядається в режимах, де витрата теплоносія протягом циклу роботи насосного агрегату змінюється відповідно до гідравлічного навантаження, характерного для HVAC додатків. Типовий цикл роботи насоса, визначений регламентом Євросоюзу [3] і поділений на 4 режими. Особливістю циклу є те, що більшу частину часу насос працює з витратою набагато меншою за номінальну. Наприклад, з витратою 25 % від номінального значення насос працює відносний час $t_i/t_\Sigma = 44\%$, де t_Σ – сумарний час роботи, прийнятий рівним 24 годинам, t_i – час роботи насоса в даному режимі. Цей профіль навантаження є типовим для насосних систем із потребою у зміні витрати в широких межах.

Отже для визначення структури споживання реактивної електроенергії електроприводом насосного агрегату необхідно на базі значень споживання активної потужності та з урахуванням коефіцієнта завантаження електроприводу та відповідного йому коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності розрахувати реактивну потужність споживану електроприводом. Крім цього для розрахунку реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти (формула 1) необхідно визначити активну потужність та струм електродвигуна. Ці показники можуть бути розраховані виходячи із результатів отриманих на основі вище наведених формул.

Такі показники розраховуємо за методикою і за технічними даними складових елементів електроприводу розробленої нами і опублікованої у роботах [5,6] для електроприводу мережевого насосного агрегату. Результати розрахунків наведено у таблиці (1).

Таблиця 1 Параметри частотно регульованого електроприводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання.

№	Режим роботи	P_1 , кВт	$\cos \varphi$	Q , в. о.	S , кВт*А	I_1 , А	M , в. о.
1	Режим: $k_{\text{зав}}=0,25$	7,3	0,7	0,04	10,4	16	0,05
2	Режим: $k_{\text{зав}}=0,5$	31,6	0,8	0,15	39,5	63,2	0,24
3	Режим: $k_{\text{зав}}=0,75$	82,2	0,81	0,31	101,4	164,4	0,55
4	Режим: $k_{\text{зав}}=1$	192,3	0,86	0,59	223,6	384,6	0,98

Примітка: Розраховано для електроприводу насосного агрегату з електродвигуном

$P_{\text{ном}} = 200\text{кВт}$ а $N_{\text{ном}}=1450$ об/хв. Реактивна потужність віднесена до $P_{\text{ном}}$, а момент до $M_{\text{ном}}$.

На рис. 2 показано залежність реактивної потужності споживаної електродвигуном від його моменту. З рисунка видно що при певному режимі роботи, наприклад при коефіцієнті завантаження 0,5 із збільшенням моменту електродвигуна споживана ним реактивна потужність зростає. При збільшенні коефіцієнта завантаження реактивна потужність споживана електродвигуном виражена у відносних одиницях зменшується. Ця залежність дозволяє енергоаудитору при проведенні попереднього енергоаудиту спрощено визначити реактивну потужність для електродвигуна за його параметрами $P_{\text{ном}}$, $N_{\text{ном}}$ використовуючи систему відносних одиниць.

На рис. 3 та 4 наведено залежність реактивної потужності Q споживаної частотним перетворювачем та коефіцієнта його потужності $\cos \varphi$ при різних фіксованих значеннях коефіцієнта завантаження електродвигуна. Розрахунки виконані для двигуна типу МЗВР315MLA4 в режимах пропорційного керування $u/f=\text{const}$ і при сталості повного потокозчеплення ротора. При побудові

залежностей використані безрозмірні величини: реактивна потужність віднесена до номінальної потужності, момент — до номінального значення моменту та частота — до номінального значення частоти напруги живлення двигуна.

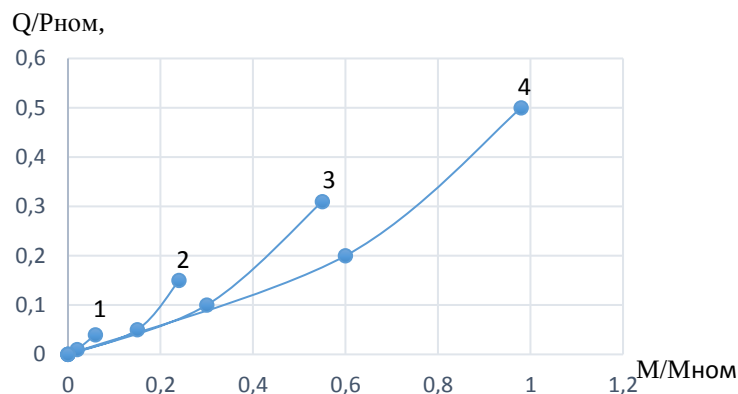


Рисунок 2 - Залежність реактивної потужності споживаної електродвигуном від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f = \text{const}$.

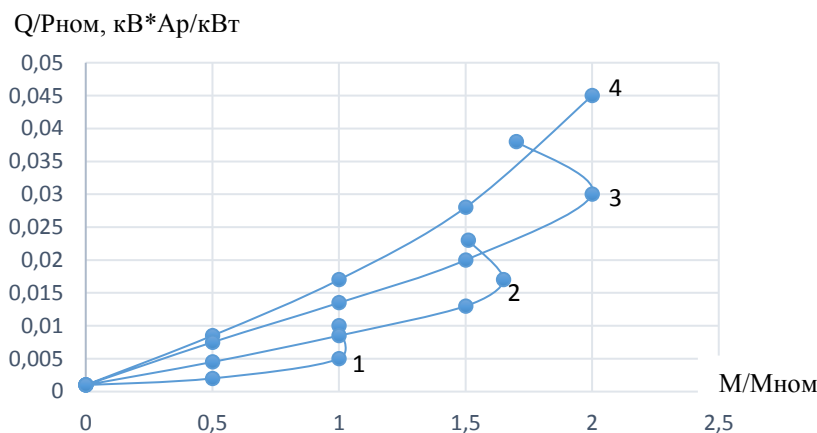


Рисунок 3 - Залежність реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти в структурі електроприводу насосного агрегату від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f = \text{const}$.

Ця залежність дозволяє при проведенні енергоаудиту попередньо оцінити споживання реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти використовуючи систему відносних одиниць. З рисунка видно що реактивна потужність споживана перетворювачем частоти складає незначну частку від загальної потужності споживаної електроприводом. Так, наприклад, для номінального моменту електродвигуна вона складає 1,8% при коефіцієнті завантаження= 1.

На рисунку 4 показано залежність коефіцієнта потужності перетворювача частоти від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f = \text{const}$.

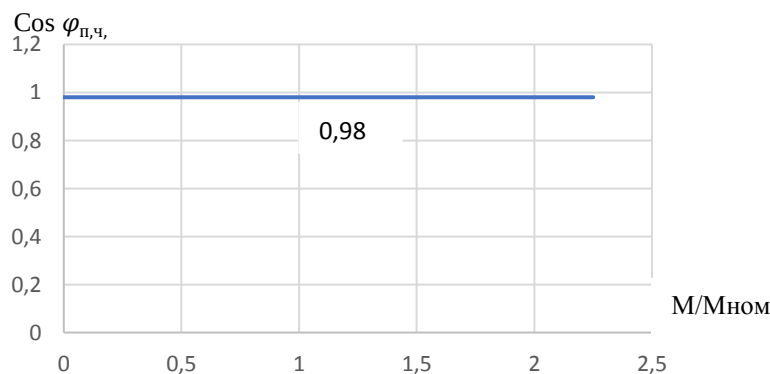


Рисунок 4 - залежність коефіцієнта потужності перетворювача частоти від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управлінн $u/f = \text{const}$.

З рисунка 4 видно що розрахований коефіцієнт потужності складає 0,98 що відповідає значенням які наводяться виробниками. Він практично не залежить від моменту електродвигуна електроприводу насосного агрегату.

Висновок. Дослідження проведенні для частотно регульованого електроприводу насосного агрегату реальної найбільш типової в мережі централізованого теплопостачання, доводять що структура споживаної електроприводом насосного агрегату реактивної потужності характеризується реактивною потужністю споживаною перетворювачем частоти та реактивною потужністю приводного електродвигуна. При цьому основна частка споживаної реактивної потужності припадає на електродвигун і залежить від режимів його роботи, в основному від величини завантаження і збільшується при збільшенні його моменту. Реактивна потужність споживана перетворювачем частоти залежить від потужності та моменту приводного електродвигуна відповідно до режиму його роботи і складає незначну частку від загальної споживаної електроприводом реактивної потужності. Отже для зменшення споживаної електроприводом реактивної потужності необхідно корегувати режими роботи двигуна, вирівнювати величину його завантаження та здійснювати заходи щодо компенсації реактивної енергії. Запропонований підхід до визначення структури споживаної електроприводом насосного агрегату реактивної потужності дозволяє енергоаудитору при проведенні енергоаудиту попередньо оцінити обсяг споживаної реактивної енергії використовуючи номінальні технічні характеристики електродвигуна. Перспектива подальших досліджень полягає в уточненні параметрів що стосуються застосування такого підходу в залежності від діапазону потужностей електроприводу.

Список використаної літератури:

1. Закладний, О. М. / Енергозбереження засобами промислового електропривода: навчальний посібник [текст] / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей, - К: Кондар, 2005. – 408 с.
2. В. В. Грабко /Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.
3. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
4. Федірко М. М. / Модернізація електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення їх енергоефективності / Федірко М. М. Брич В. Я., Бруханський Р. Ф., Брич В. Я., Олішинська Р. Р. / "Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит". – 2023. – № 5-6 (183-184). – С. 27-40 / <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/95c4042b-15ab-414e-8df4-80b844be9a73>
5. Федірко М. М. / Частотне регулювання електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором / Федірко М. М., Брич В. Я., Горлачук М. А., Завитій О. П., Головка Р. В. / "Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит". – 2023. – № 7-8 (185-186). – С. 22-32. / <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/fdf80c4e-2867-4a53-a582-79054de5b181>
6. Федірко М.М. / Термодинамічні імперативи модернізації електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення енергоефективності. / Федірко М.М., Головка Р.В. / Журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». – 2023. - №1. С. 43 – 49 <http://energy.kpi.ua/article/view/297523>
7. Сумська насосна техніка. URL: <https://sumnt.com/>
8. Каталог АВВ Двигуни і генератори. URL: <https://new.abb.com/motors-generators%204>
9. Каталог АВВ Приводи АВВ для систем опалення, вентиляції і кондиціонування повітря. URL: <https://global.abb/group/en>
10. Коренькова Т. В. / Режим роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с. URL: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vidrewumu%20robotu.pdf

M. Fedirko¹, PhD in Economics, Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-8244-3478
M. Horlachuk¹, PhD in Economics, Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-8030-1193
O. Zavytii¹, PhD in Economics, Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-7439-6923

O. Koshparenko¹, student
¹West Ukrainian National Institute

DETERMINATION OF THE STRUCTURE OF REACTIVE POWER CONSUMED BY THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS OF THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY NETWORK IN THE CONTEXT OF ITS ENERGY AUDIT

Approaches to determining the structure of the reactive power consumed by the electric drive of pumping units of the centralized heat supply network are substantiated, and recommendations are given for their application when conducting their energy audit for the development of measures to increase their power factor. A method for calculating the reactive energy consumed by both the frequency converter and the drive asynchronous electric motor is defined. The dependence of the reactive power consumed by the electric motor on its torque and the dependence of the reactive power consumed by the frequency converter on the power of the electric motor and its torque have been established. These dependencies are set for the proportional control mode $u/f = \text{const}$. The results prove that the main part of the consumed reactive power falls on the electric motor and depends on its operating modes, mainly on the amount of its load. The reactive power consumed by the frequency converter depends on the power and torque of the drive electric motor in accordance with its operating mode and is a small part of the total reactive power consumed by the electric drive.

The proposed approach allows the energy auditor, when conducting an energy audit of frequency-regulated electric drives of pump units of the centralized heat supply network, to preliminarily, using a simplified procedure, estimate the amount of reactive energy consumed by the electric drive and the modes of operation and the compliance of the modes of operation of the centralized heat supply network with technological requirements.

Keywords: reactive power, electric drive of pumping units, power factor, frequency converter, asynchronous electric motor, law of proportional control.

References:

1. Zakladny, O. M. / Energy saving by means of an industrial electric drive: study guide [text] / O. M. Zakladny, A. V. Prakhovnyk, O. I. Solovei, - K: Kondar, 2005. – 408 p.
2. V. V. Grabko / Method and means of optimizing the operation of electric drives of a water supply pumping station: monograph / V. V. Grabko, M. M. Moshnoriz. – Vinnytsia: VNTU, 2011. – 138 p.
3. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by the Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
4. Fedirko M. M. / Modernization of the electric drive of pump units of the centralized heat supply network in the context of increasing their energy efficiency / Fedirko M. M., Brych V. Ya., Brukhansky R. F., Brych V. Ya., Olishynska R. R. / "Energy conservation. Energy. Energy audit". – 2023. – No. 5-6 (183-184). – P. 27-40 / <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/95c4042b-15ab-414e-8df4-80b844be9a73>
5. Fedirko M.M. / Frequency regulation of the electric drive of pump units of the centralized heat supply network based on asynchronous motors with a short-circuited rotor / Fedirko M.M., Brych V.Ya., Gorlachuk M.A., Zavytiy O.P., Golovko R. V. / "Energy conservation. Energy. Energy audit". – 2023. – No. 7-8 (185-186). – P. 22-32. / <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/fdf80c4e-2867-4a53-a582-79054de5b181>
6. Fedirko M.M. / Thermodynamic imperatives of modernizing the electric drive of pumping units of the district heating network in the context of increasing energy efficiency. / Fedirko M.M., Golovko R.V. / Magazine "Energy: economy, technology, ecology". – 2023. – #1. P. 43 – 49 <http://energy.kpi.ua/article/view/297523>
7. Sumy pumping equipment. URL: <https://sumnt.com/>
8. Catalog ABB Engines and generators. URL: <https://new.abb.com/motors-generators%204>
9. ABB catalog ABB drives for heating, ventilation and air conditioning systems. URL: <https://global.abb/group/en>
10. Korenkova T. V. / Modes of operation of pump and fan installations with an automated electric drive: training. manual / T.V. Korenkova, O.O. Serdyuk, V.G. Kovalchuk. – Kremenchuk: Publishing House PP Shcherbatykh O. V., 2013. – 200 p. URL: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf

Надійшла: 10.03.2025
Received: 10.03.2025

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІРОЛІЗУ ГУМОВИХ І ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ВІДХОДІВ

Кількість відходів, що утворюються внаслідок нашого повсякденного життя та виробничих процесів, постійно зростає і вже є проблемою в деяких регіонах та містах. Ми повинні розуміти, що неперероблені відходи, які накопичуються в тоннах щодня, негативно впливають як на біосферу нашої планети, так і на здоров'я громадян. Території, які вже не можна рахувати у гектарах, а лише у відсотках від загальної площі нашої країни, приречені на забруднення на десятиліття.

Стаття присвячена дослідженню та розробці ефективних методів утилізації відходів гуми та поліетилену за допомогою піролізу [1-6]. У сучасному світі проблема переробки відходів стає все більш актуальною через постійне зростання кількості відходів та їх негативний вплив на довкілля [6-15]. Неправильне управління відходами не тільки погіршує екологічний стан, але й призводить до втрати цінних ресурсів. Метою статті є вирішення цієї проблеми шляхом створення автоматизованої системи управління процесом піролізу.

Головним об'єктом дослідження є піролізна установка, яка перетворює відходи гуми та поліетилену на горючі гази, рідкі продукти піролізу та технічний вуглець. Ця технологія не лише зменшує обсяг відходів, а й забезпечує додаткове джерело енергії, що є важливим кроком на шляху до енергетичної незалежності.

Дослідження детально аналізує різні види сировини, їх характеристики та вплив на процес піролізу. Значну увагу приділено розробці автоматизованої системи управління для оптимізації процесу та підвищення ефективності й безпеки роботи установки. Дослідження включає як теоретичні аспекти, так і практичні розрахунки та моделювання системи.

Ключові слова : *піроліз, відходи гуми, відходи поліетилену, автоматизована система керування, електромеханічне обладнання, екологічна стійкість, утилізація відходів, програмовані логічні контролери (plc), охорона праці, енергетична незалежність.*

1. Вступ

Піроліз гуми є складним фізико-хімічним процесом розщеплення великих молекулярних ланцюгів на менші. Це призводить до розпаду матеріалу на компоненти, а саме: піролізний газ, піролізне масло, вуглецеві залишки та металевий дріт. Процес відбувається у закритому реакторі в анаеробних умовах і технічно поділяється на три стадії (нагрівання, активна фаза піролізу та охолодження). Наше розроблення пропонує інтеграцію інтелектуальної системи автоматизації в процес керування циклом піролізу, яка може поєднуватися з моделлю машинного навчання та регулювати процес на її основі.

Ми проаналізували термогравіметричні криві різних типів гуми у різних дослідженнях [3-4] і виявили закономірність, яка дозволяє визначити температурні межі для оптимальних циклів піролізу. Досліджуючи роботи наших колег [5], ми чітко встановили залежність між часом нагрівання сировини та кількістю кінцевого продукту, який можна отримати. Занадто швидке або повільне нагрівання призводить до погіршення фракціонування. Аналіз термогравіметричних кривих зразків гуми при різних швидкостях нагрівання показав, що кожен зразок гуми має свої характерні піки при певних температурах. Наприклад, натуральний каучук (NR) має значний пік при 378°C, тоді як стирол-бутадієнова гума (SBR) показує дві стадії втрати маси, основна з яких при 457°C, що пов'язано з розкладом полімеру.

Проблема, з якою ми зіткнулися, полягає в тому, що відходи автомобільних шин мають досить різний внутрішній склад, навіть в межах однієї партії, завантаженої в реактор. Це призводить до змішування піків розкладання гуми під час процесу піролізу, що негативно впливає на кількість кінцевого продукту. Якщо гума перегріта, тобто подається занадто багато енергії під час переходу до газових пальників, ми отримуємо більше летючих компонентів піролізного газу замість олії. З іншого боку, якщо процес занадто повільний, результатом будуть важкі фракції, які складніше очистити для подальшого використання.

2. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Електропостачання почалося з опису об'єкта проекту — ангару площею 600 м², розташованого в промисловій зоні. Головним завданням цього ангару-майстерні є піроліз відходів автомобільних шин із використанням різного електромеханічного обладнання, такого як дробарки, гідравлічні ножиці, пальники

та вентилятори тощо. З огляду на характер операцій, особлива увага приділяється забезпеченню безперебійного електропостачання та надійності системи.

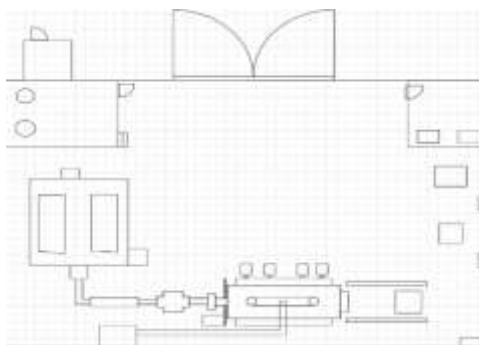


Рисунок 1 — План ЕП

Розрахунок освітлення приміщень майстерні здійснювався методом коефіцієнта використання світлового потоку. Було визначено необхідний світловий потік для досягнення оптимальної освітленості, встановленої на рівні 400 люкс. Розрахунки показали, що для забезпечення необхідного освітлення потрібно 18 світильників із загальною потужністю 3600 Вт. Також було виконано розрахунки для допоміжних приміщень, таких як вентиляційна кімната та операторська.

Розрахунок електричного навантаження включав характеристику основних споживачів електроенергії, обґрунтування кількості та розміщення розподільних пунктів і освітлювальних щитків. Загальна розрахункова потужність для майстерні становить 35,41 кВт з реактивною потужністю 23,67 кВАр. Для поліпшення коефіцієнта потужності до рівня не менше 0,92 було обрано компенсуючий пристрій моделі UKRM-04-10, який забезпечує необхідну реактивну потужність після компенсації.

Трансформатори вибиралися на основі розрахунку активних та реактивних втрат потужності, а також розрахунку електричних мереж за допустимими втратами напруги. Було обрано трансформатори типу ТМ-40/10/0.4 з відповідними параметрами для забезпечення надійної роботи електросистеми.

Деякі електричні приймачі в майстерні відносяться до 1-ї категорії приймачів, що вимагає подачі електроенергії від двотрансформаторної підстанції. Це було ключовим фактором у

3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Системи, включаючи автоматизовані системи, складаються з методів, які реалізують процеси. Методи є набором інструментів або кроків, необхідних для розв'язання конкретного завдання. У керуванні застосовуються різні методи для отримання, аналізу та видачі команд. Весь процес керування пропонується прив'язати до внутрішньої мережі підприємства з використанням різного обладнання.

3.1. Вибір компонентів

Вибір компонентів для автоматизованої системи керування процесом піролізу є багаторівневим. Зокрема, це стосується датчиків температури, тиску, ваги, вологості, виконавчих пристроїв, а також засобів візуалізації та сигналізації. Особливу увагу слід приділити вибору датчиків температури та тиску, оскільки вони повинні забезпечувати високу точність вимірювань і витримувати жорсткі умови. Проектування та впровадження системи автоматизації практично не мають обмежень. Однак наша увага зосереджена на моделюванні інтелектуальної системи керування самим процесом піролізу. Керування виконавчими механізмами здійснюється за допомогою системи контакторів, яка безпосередньо контролюється командами від програмованого логічного контролера (PLC).

Для розширення можливостей керування системою було обрано новітній модуль S7-1500 TM NPU, що підтримує встановлення нейронних мереж. Відомий своєю продуктивністю та надійністю, модуль S7-1500 значно перевершує своїх попередників завдяки швидкій обробці даних, більшій пам'яті та розширеним можливостям зв'язку. Цей контролер забезпечує швидкий відгук на зміну умов процесу, покращену інтеграцію з іншими системами та більшу гнучкість у налаштуваннях. Однією з ключових переваг S7-1500 є його модульність і багатофункціональність. У роботі пропонується два різні методи інтеграції нейронних мереж у систему.

Перший метод передбачає встановлення модуля обробки нейронних мереж (NPM), зокрема моделі 6ES7677-2AA00-0AA0. Цей модуль дозволяє інтегрувати попередньо навчений нейронний мережевий алгоритм у систему, попередньо запрограмований на SD-карті. Для цього використовуються такі інструменти, як TensorFlow, відкрита програмна бібліотека, розроблена компанією Google для реалізації нейронних мереж. Ця конфігурація працює на основі попередньо запрограмованої та навченої моделі, яка базується на попередніх циклах і може автономно налаштовуватися за навченою схемою. Як перевагою, так і недоліком цієї схеми є те, що вона замкнена, тобто працює на першому рівні без можливості

самостійного розвитку або адаптації до конкретних завантажень у реакторі. Цей підхід забезпечує більшу гнучкість, ніж просто програмування постійних значень керування в PLC, але все ж не є ідеальним.

Другий метод інтеграції управління нейронними мережами є більш ефективним, глобальним та складним. Він передбачає впровадження системи управління вищого рівня через SCADA-пакет. Використовуючи сервер, який взаємодіє з контрольним пунктом, дані в режимі реального часу надсилаються від PLC до замкненої мережі підприємства, яка обробляє отримані дані за допомогою навченої штучної інтелектуальної системи. У цьому режимі інструкції безперервно надходять у систему та коригуються. Перевага цієї системи полягає в її повній автономності та якості. З такою системою можливо об'єктивно оцінювати та контролювати продуктивність кожного циклу.

3.2. Моделювання системи автоматизації

Друга частина цього розділу присвячена моделюванню системи автоматизації для заводу з переробки відходів. Комплексне моделювання алгоритмів управління було проведено з акцентом на підтримання оптимальних температурних умов, регулювання тиску в реакторі та забезпечення загальної безпеки процесу. Було розроблено контрольний пункт для виконання цих алгоритмів управління.

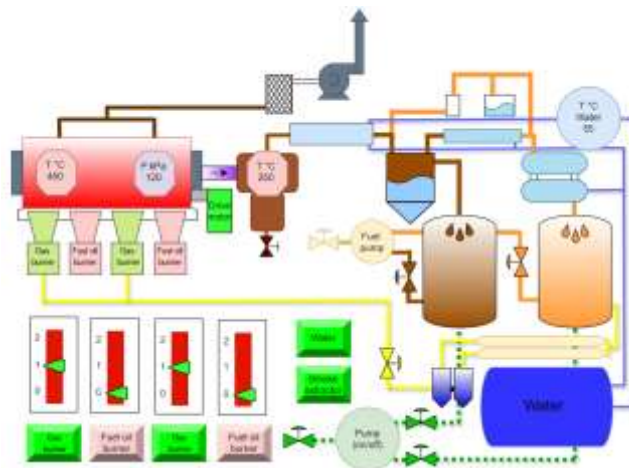


Рисунок 2 — Мнемосхема керування

Особливу увагу приділено інтеграції системи управління з існуючою технологічною інфраструктурою майстерні. Це забезпечило надійну взаємодію між різними елементами системи, підвищило загальну ефективність та зменшило ризик аварій. Також була розроблена система аварійного вимкнення, яка активується при перевищенні допустимих параметрів процесу, що забезпечує додатковий рівень безпеки.

Висновок

Дослідження системи керування процесом піролізу гумових і поліетиленових відходів є значним кроком уперед у сфері управління відходами та відновлення ресурсів. Перетворення відходів на паливо за допомогою цієї технології не лише вирішує зростаючі екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією відходів, але й сприяє енергетичній незалежності. Інтеграція сучасного електромеханічного обладнання та передових технологічних підходів забезпечує оптимізацію та автоматизацію процесу піролізу для досягнення ефективності та безпеки, що є критично важливим для промислових застосувань.

Дослідження підкреслює важливість ретельного підходу до кожного етапу аналізу та розробки для покращення процесу піролізу. Реалізація надійної, інноваційної автоматизованої системи керування, яка включає різноманітні методи та їх варіації, відіграє критичну роль у підтримці оптимальних умов протягом усього процесу. Включення модуля Siemens S7-1500 з нейронним обчислювальним блоком демонструє потенціал інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання для подальшого покращення керування процесом і підвищення його ефективності. Такий підхід не лише покращує якість кінцевої продукції, але й забезпечує безпеку експлуатації установки піролізу. Впровадження вертикального реактора періодичної дії з обертовим барабаном виявилось ефективним рішенням для піролізу неоднорідних відходів. Ця конструкція реактора демонструє свою ефективність у переробці великих обсягів сировини з високою якістю. Крім того, комплексна енергетична система та заходи безпеки, окреслені в дослідженні, забезпечують надійну і безпечну роботу установки, мінімізуючи ризик аварій і гарантують здоров'я та безпеку працівників. У цілому, це дослідження забезпечує детальну основу для ефективного та стійкого управління гумовими і поліетиленовими відходами за допомогою сучасних технологій піролізу.

Список використаної літератури

1. Aksenov, A.F., Seregin, E.P., Yanovskii, L.S. та ін. Поточна парадигма і перспективи зростання хеммотології. *Chem Technol Fuels Oils* 49, 298–308 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10553-013-0445-5>.
2. Папін, А.В., Ігнатова, А.Ю., Макаревич, Є.А. Шляхи утилізації зношених автомобільних шин та аналіз можливості використання технічного вуглецю для піролізу зношених шин. *Вісник КузГТУ*, 2015, № 2(108), с. 96–100.
3. Переробка поліетилену: технологія вторинного використання відходів // URL: <https://rcycle.net/plastmassy/polietilen/pererabotka-tehnologii-vtorichnogo-ispolzovaniya-othodov>, доступ: 05.11.2020.
4. Бондаренко І., Дудар І., Яворовська О., Зюсь О., Бойченко С., Куберський І., Шкільнюк І., Комариста Б., Джигирей І., & Бендіух В. (2021). Розробка технології локалізації забруднення довкілля під час пожеж на стихійних сміттєзвалищах та її лабораторне випробування. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 6(10 (114), 40–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248252>.
5. Бендіух В., Маркіна Л., Мацай Н., Кирпичова І., Бойченко С., Прядко С., Шкільнюк І., Комариста Б., Єрмакович І., & Власенко О. (2023). Інтегрований метод планування управління відходами на основі аналізу матеріальних потоків та оцінки життєвого циклу. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 1(10 (121), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273930>.
6. Шкільнюк І., Бойченко С. (2020). Біологічний ризик постачання авіаційного палива. У книзі: Бабак В., Ісаєнко В., Запорожець А. (ред.) Системи, рішення і контроль в енергетиці І. Дослідження в системах, рішеннях та управлінні, том 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_12.
7. Бойченко С., Зубенко С., Коновалов С., & Яковлева А. (2020). Синтез етилових ефірів масла *Camelina* як компонентів реактивних палив. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 1 (6 (103), 42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196947>.
8. Лорія М., Целішев О., Єлісєєв П., Поркуян О., Гурін О., Абрамова А., & Бойченко С. (2022). Принципи та етапи створення систем автоматичного управління з моделлю складних технологічних процесів. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 6(6 (120), 20–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>.
9. Байкалов Ю., Джигирей І., Бендіух В., Проскурнін О., Березенко К., Бойченко С., Крючков А., Сергієнко М., Данілін О., & Кутняшенко О. (2022). Удосконалення технології рекультивції кар'єрів і відвалів. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 4(10 (118), 38–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263513>.
10. Яковлева А., Бойченко С., Калє У. та Надь А. (2021). "Комплексні підходи та передові технології у переробці авіаційної продукції", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93 No. 8, pp. 1302-1312. <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0068>.
11. Вікторія Рибун, Сергій Бойченко, Утку Калє, "Прогрес у технології газорідного синтезу для екологічно чистого палива: аналітичний огляд світових досягнень", *Energy Reports*, Том 9, 2023, С. 5500-5508, <https://doi.org/10.1016/j.egyrt.2023.04.37>.

S. Boichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

A. Soldatenko¹, student, ORCID 0009-0002-0628-6831

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT AND AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE PYROLYSIS PROCESS OF RUBBER AND POLYETHYLENE WASTE

The amount of waste generated as a result of our daily lives and industrial processes continues to grow and has already become a problem in some regions and cities. We must understand that untreated waste, which accumulates in tons every day, negatively impacts both the biosphere of our planet and citizens' health. Areas that can no longer be measured in hectares but only as a percentage of our country's total land are condemned to pollution for decades.

This article is dedicated to researching and developing effective methods for the utilization of rubber and polyethylene waste through pyrolysis [1-6]. In the modern world, the issue of waste recycling is becoming increasingly relevant due to the constant increase in waste and its negative environmental impact [6-15]. Improper waste management not only worsens the ecological condition but also leads to the loss of valuable resources. The goal of the article is to address this problem by creating an automated control system for the pyrolysis process.

The main object of research is a pyrolysis plant that converts rubber and polyethylene waste into combustible gases, liquid pyrolysis products, and carbon black. This technology not only reduces the amount of waste but also provides an additional source of energy, which is an important step toward energy independence.

The study thoroughly analyzes various types of raw materials, their characteristics, and their influence on the pyrolysis process. Significant attention is paid to developing an automated control system to optimize the process and enhance the efficiency and safety of the plant's operation. The research encompasses both theoretical aspects and practical calculations and system modeling.

Keywords : *pyrolysis, rubber waste, polyethylene waste, automated control system, electromechanical equipment, environmental sustainability, waste utilization, programmable logic controllers (plc), occupational safety, energy independence.*

References

1. Aksenov, A.F., Seregin, E.P., Yanovskii, L.S. et al. Current paradigm and growth prospects of chemmotology. *Chem Technol Fuels Oils* 49, 298–308 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10553-013-0445-5>.
2. Papin, A.V., Ignatova, A.Yu., Makarevich, E.A. Ways of recycling waste tires and analysis of the possibility of using carbon black for pyrolysis of used tires. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 2(108), pp. 96–100.
3. Recycling of polyethylene: technology of secondary use of waste // URL: <https://rcycle.net/plastmassy/polietilen/pererabotka-tehnologii-vtorichnogo-ispolzovaniya-othodov>, accessed: 05.11.2020.
4. Bondarenko, I., Dudar, I., Yavorovska, O., Ziuz, O., Boichenko, S., Kuberskyi, I., Shkilniuk, I., Komarysta, B., Dzhygyrey, I., & Bendiuh, V. (2021). Devising the technology for localizing environmental pollution during fires at spontaneous landfills and testing it in the laboratory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (114)), 40–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248252>.
5. Bendiuh, V., Markina, L., Matsai, N., Kyrpychova, I., Boichenko, S., Priadko, S., Shkilniuk, I., Komarysta, B., Yermakovich, I., & Vlasenko, O. (2023). Integrated method for planning waste management based on the material flow analysis and life cycle assessment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (121)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273930>.
6. Shkilniuk, I., Boichenko, S. (2020). Biological Risk of Aviation Fuel Supply. In: Babak, V., Isaienko, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_12.
7. Boichenko, S., Zubenko, S., Kononov, S., & Yakovlieva, A. (2020). Synthesis of Camelina oil ethyl esters as components of jet fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (103)), 42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196947>.
8. Loria, M., Tselishchev, O., Elisayev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., & Boichenko, S. (2022). Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6 (120)), 20–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>.
9. Baikalov, Y., Dzhygyrey, I., Bendiuh, V., Proskurnin, O., Berezenko, K., Boichenko, S., Kryuchkov, A., Serhiienko, M., Danilin, O., & Kutniashenko, O. (2022). Improvement of quarry and slagheap reclamation technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (118)), 38–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263513>.
10. Yakovlieva, A., Boichenko, S., Kale, U., & Nagy, A. (2021). Holistic approaches and advanced technologies in aviation product recycling. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93 No. 8, pp. 1302–1312. <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0068>.
11. Viktoriia Ribun, Sergii Boichenko, Utku Kale. Advances in gas-to-liquid technology for environmentally friendly fuel synthesis: Analytical review of world achievements. *Energy Reports*, Volume 9, 2023, pp. 5500–5508. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.37>.

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ SMART-МОНІТОРИНГУ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ, ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Наукова теорія моніторингу в енергетиці потребує свого розвитку з урахуванням задач енергетичного переходу, реалізації концепції Smart Grid на місцевому рівні, зокрема, на локальному рівні енергозабезпечення з розподіленими джерелами енергії, які працюють на низькій та в окремих випадках на середній напрузі, де задачі моніторингу і керування досить глибоко взаємопов'язані і мають відображати різноманітну специфіку побудови та функціонування локальних електроенергетичних систем. Науково-технічне обґрунтування застосування Smart-моніторингу електроенергетичної системи середньої та низької напруги розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, тобто як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому. Проведено аналіз глобального моніторингу WAMS, його різновидів та Smart-моніторингу. Системи WAMS та WAMPAC застосовуються на рівні високої та середньої напруги (оператори передачі електроенергії), тоді як сфера застосування Smart-моніторингу – середні та низькі напруги. Наведено взаємодія розглянутих технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями DSM. Для організації роботи системи Smart-моніторингу необхідно провести: комплексний моніторинг електроенергії, енергетичного балансу та моніторинг потреб різних користувачів локальних системи; моніторинг роботи джерел розподіленої енергії та якості електроенергії та моніторинг навантаження. Наведено узагальнений алгоритм застосування Smart-моніторингу для оцінки технічних показників та участь у формуванні тарифів для участі на локальних ринках.

Ключові слова: моніторинг, мікромережа, відновлювальні джерела енергії, локальна електроенергетична система, керування попитом.

Вступ.

Вимоги реалізації енергетичного переходу енергетики України, оптимального поєднання централізованої та децентралізованої складової вимагають цілісного підходу до організації взаємодії всіх складових системи: генеруючих активів, електромережі та навантажень, що має бути ефективно інтегровано з метою оптимізації виробництва електроенергії, зниження втрат при її передачі і розподілу та мінімізації викидів вуглецю [1 – 4].

Лібералізація ринку електроенергії, генерація з розподілених відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та постійне зростання енергоспоживання ставлять економічний прибуток перед технологічними вимогами як визначальний фактор у стратегічних рішеннях розвитку енергосистеми.

Актуальність сумісного вирішення задач моніторингу та керування як на рівні ОЕС України, так і на рівні систем передачі і розподілу, локальному рівні енергозабезпечення обумовлена необхідністю врахування тенденцій переходу в енергетиці від продукції і технологій до сервісу. Тому зростає потреба в модернізації систем передачі та розподілу електроенергії, у першу чергу, розгортання передових вимірювальних технологій за напрямками: інтеграція розподілених енергетичних ресурсів (ВДЕ електротранспорту та систем зберігання енергії, керування попитом); надійність та стійкість; якість електроенергії та якість енергопостачання; розвиток (еволюція) наявних технологій передачі та розподілу електроенергії (рис.1) [3].

Актуальність розвитку моніторингу, як в централізованих, так і в локальних електроенергетичних системах (ЛЕС), визначено у відповідних директивах ЄС. В 2019 р. Рада міністрів ЄС офіційно ухвалено чотири нові законодавчі акти ЄС, які переробляють ринок електроенергії ЄС, щоб зробити його придатним для майбутнього [5]. У травні 2022 р. Європейська Комісія представила план REPowerEU, в якому викладений курс впровадження та використання «зелених» джерел енергії [6].

На сьогодні в Україні є нагальним вирішення наукової проблеми побудови проблемно орієнтованого моніторингу ЛЕС із використанням додаткових опцій та ієрархічної побудови. Пропонується розвиток та поширення науково-технічних основ моніторингу в енергетиці, на ЛЕС з відновлюваними джерелами енергії низької напруги (до 35 кВ). Власне виділений клас систем набуває пріоритетного розвитку і саме там на сьогодні відбуваються найбільш революційні зміни щодо їх інтелектуалізації та сфер застосування.

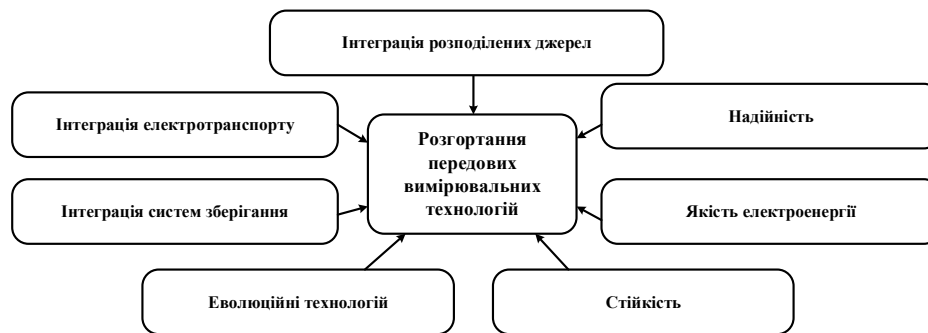


Рисунок 1 - Ключові напрямлення, що сприяють розгортанню передових вимірювальних технологій

В [7] запропоновано розширене поняття моніторингу в енергетиці: моніторинг в енергетиці – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами в енергетиці та оцінювання їх стану. На відміну від відомих класичних визначень, запропоновано моніторинг в електроенергетиці розглядати як спостереження та оцінювання стану, а під оцінюванням стану розуміти не тільки поточне оцінювання, а й ретроспективний аналіз та прогнозування стану.

У цьому визначенні моніторинг розглядається для електроенергетичних систем високої та середньої напруги, а також враховується, що будь-який технологічний процес – це не тільки власне процес, а різноманітне обладнання, за допомогою якого він реалізується, функціональні матеріали, зовнішнє середовище, що впливають на технологічний процес. При такому визначенні організаційна, управлінська, фінансово-економічна діяльність у галузі енергетики не є предметом моніторингу, оскільки безпосередньо не належить до технологічного процесу; до процедур моніторингу в електроенергетиці не включається розповсюджена в енергетиці інформаційна процедура, як комерційний облік енергії, що визначається її економічним, а не технологічним призначенням. Власне моніторинг зі спостереження і оцінкою стану передбачає контроль, діагностику та розпізнавання образів.

Однак запропонована наукова теорія моніторингу в енергетиці потребує свого розвитку з урахуванням задач енергетичного переходу, реалізації концепції Smart Grid на регіональному (місцевому) рівні, зокрема, на локальному рівні енергозабезпечення з ВДЕ, які працюють на низькій та в окремих випадках на середній напрузі, де задачі моніторингу і керування досить глибоко взаємопов'язані і мають відображати різноманітну специфіку побудови та функціонування виділених ЛЕС.

На сьогодні система глобального моніторингу (Wide-area monitoring/measurement system, WAMS) є комплексом систем, який відстежує стан централізованої енергосистеми та здатний реалізувати програми моніторингу та оцінки WAMS здатна працювати на значних територіях, охоплюючи електроенергетичну систему в цілому. Сучасні WAMS фактично є технологією не тільки моніторингу, але й керування та контролю динаміки електричних мереж високої напруги, які здійснюються в реальному часі [8].

Проблеми перевантаження електромережі та збоїв в усьому світі підкреслили необхідність удосконалення електромереж за допомогою систем глобального моніторингу, захисту та контролю (WAMPAC) як економічно ефективного рішення для покращення планування, експлуатації, обслуговування та торгівлі енергією. Системи WAMPAC використовують переваги останніх досягнень у сенсорних, комунікаційних, обчислювальних, візуалізаційних і алгоритмічних методах. Технологія синхронізованих вимірювань (SMT), включаючи одиниці вимірювання фазора (PMU) і її програми, є важливим елементом і чинником WAMPAC. Наявний досвід створення великомасштабних систем WAMPAC показав, що ключовим елементом у створенні системи WAMPAC є розробка відповідної стратегії та створення детального плану встановлення. Крім того, інвестиції в такі системи можуть бути оптимізовані, якщо належним чином розроблено проект, адаптований до конкретних потреб даної енергетичної системи.

Smart-моніторинг розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому [8].

Мета роботи розвиток теорії моніторингу сучасних локальних електроенергетичних систем та виділення особливостей реалізації Smart-моніторингу при генерації, передачі та розподілу електроенергії.

Матеріали досліджень.

Основа моніторингу – це інформаційні процедури, за допомогою яких отримується кількісна або якісна інформація про властивості об'єкта моніторингу та його стан. При цьому обробка інформації включає операції збирання, введення, записування, перетворення, зчитування, зберігання, реєстрація та потребує свого розвитку з урахуванням таких категорій як кількість та якість, їх взаємоперетворення [10].

Основні завдання традиційного моніторингу в електроенергетиці можна визначити наступним чином:

– негайне, в режимі on-line забезпечення інформацією в необхідному, інколи досить малому реальному часі автоматичного керування (автоматичного регулювання, автоматики, релейного захисту, стеження та ін.);

– негайне, в режимі on-line забезпечення інформацією автоматизованого та ручного оперативно-диспетчерського керування;

– накопичення даних, створення баз даних, баз знань, архівів;

– проведення ретроспективного (тенденції, напрями, оцінки розвитку) та поточного (спостереження, контроль, діагностика, розпізнавання образів) аналізу ситуацій з оцінкою стану об'єктів моніторингу;

– організація передачі, обміну моніторинговою інформацією між об'єктами та суб'єктами ієрархічної структури, що мають відношення до технологічних процесів в електроенергетиці.

Втілення принципу інтегральної організації моніторингу в традиційній (централізованій) електроенергетиці означає створення єдиного інформаційного поля на окремих електроенергетичних об'єктах моніторингу та єдиного інформаційного простору в об'єднаних чи єдиних енергосистемах країни чи декількох країн (глобальний моніторинг) [10, 11]. При цьому інформація розглядається як оброблені, організовані та пов'язані дані, що породжують зміст (значення) (згідно стандарту ISO 5127:2017). Ефективність використання інформації визначаються показниками її якості, зокрема:

– *точністю*, обумовлена ступенем її близькості до реального стану об'єкта, процесу, явища тощо;

– *актуальністю*, визначається ступенем збереження цінності інформації в момент її використання; цей показник стосується інформації, яка змінюється в часі;

– *достовірністю*, яка визначається її здатністю відображати існуючі об'єкти з необхідною точністю; одиницею вимірювання достовірності може служити довіра ймовірність необхідної точності;

– *доступністю* для сприйняття користувачем, що забезпечується виконанням відповідних процедур її отримання.

Застосування WAMS дозволяє оцінити загальну тенденцію щодо експлуатації електроенергетичних систем близько до їх меж стабільності з метою збільшення потужності передачі електроенергії, відповідно зменшуючи запаси безпеки та збільшуючи збурення та ризик знеструмлення. Було визначено наступні переваги WAMS для електроенергетичних систем нового покоління:

– моніторинг та контроль електромережі в режимі реального часу;

– синхронізація та архівування всіх даних;

– наявність у доступі всієї інформації про параметри режиму (значення струмів, напруги, фазових кутів, активної та реактивної потужності) та мережі (потужність навантаження);

– можливість відстежування динаміки всієї системи із запобіганням, по можливості, небажаним порушенням у системі;

– наявність на підстанціях можливості розрахунку рівнів відхилення високої напруги.

Для побудови системи WAMPAC необхідно дуже детально розглянути питання, пов'язані з інфраструктурою, додатками, процедурами. У цьому сенсі критичні особливості та потреби даної енергосистеми. Вони визначають архітектуру системи та пріоритети додатків майбутньої системи WAMPAC.

З точки зору дизайну системи WAMPAC є оптимальним підходом застосування відповідного середовища моделювання для розробки та тестування функціональності WAMPAC.

Одним із конкретних проблем у найближчому майбутньому є ймовірність широкого розгортання PMU, інтегрованих в єдину систему WAMPAC. Очікується, що деякі дані, доступні з реальних PMU будуть оцінені за допомогою розроблених методів моделювання. Таким чином, перевірка існуючих мережевих моделей представлятиме особливий інтерес.

В [12] відмічається, що в блоках синхронних вимірювань SMT, які представляють інтерес для використання у системах розподілу окрім блоки вимірювання фази (PMU), які моделюють вхідні сигнали як синусоїди та забезпечують їх величину, фазу (синхронізовані вектори) і частоту є блоки вимірювання форми (Waveform measurement units WMU), також відомі як датчики "точка на хвилі". Вони включають цифрові реєстратори несправностей, динамічні реєстратори збоїв і вимірювачі якості електроенергії. Вони є альтернативою в програмах, де потрібні дані про форму сигналу (наприклад, для аналізу перехідних процесів системи).

Ключовим фактором для сучасних систем широкомасштабного моніторингу (Wide-Area Monitoring Systems, WAMS) є впровадження кількох PMU, розміщених у кількох місцях мережі, як доповнення до звичайних вимірювань. PMU забезпечують доступність синхронізованих у часі знімків мережі, включаючи кути фази напруги та струму. Було запропоновано різноманітні додатки WAMS з використанням цих масштабних вимірювань.

На сьогодні система глобального моніторингу (Wide-area Monitoring System, WAMS) є комплексом систем, який відстежує стан централізованої енергосистеми та здатний реалізувати програми моніторингу та оцінки WAMS здатна працювати на значних територіях, охоплюючи електроенергетичну систему в

цілому. Визначено, що сучасні WAMS фактично є технологією не тільки моніторингу, але й керування та контролю динаміки електричних мереж високої напруги, які здійснюються в реальному часі.

Запропонована WAMS «Регіна-Ч» [13] є прикладом успішної розробки WAMS в Україні, яка призначена для: реєстрації миттєвих значень струмів і напруги перехідних процесів; вимірювання сили, напруги, потужності, фази і частоти змінного струму; зберігання в пам'яті результатів вимірювань; програмної обробки вимірювальної інформації, виведення її у вигляді цифрових масивів і текстових повідомлень, а також передачі її на будь-які рівні з прив'язкою до сигналів точного часу, отриманих від GPS приймача.

WAMS «Регіна-Ч» розроблялася як комплексна система, яка відстежує стан електроенергетичної системи на основі приладу синхронізованих векторних вимірювань (Phasor Measurement Units, PMU). Застосування технології синхрофазора сприяло новим розробкам, які можна класифікувати за трьома категоріями: широкомасштабний моніторинг енергетичної системи (WAMPS), широкомасштабний захист енергетичної системи (WAPPS) і широкомасштабний контроль енергетичної системи (WAPSC) у режимі реального часу та офлайн-ситуаціях [13].

Проблеми перевантаження електромережі та збоїв в усьому світі підкреслили необхідність удосконалити електромережі за допомогою інтелектуальних програм (SmartGrids, Flexnet і Intelligrid), що забезпечують підтримку прийняття рішень операторами та автоматизацію для забезпечення оптимального використання активів, зберігаючи при цьому безпеку системи та теплові обмеження для установок і контурів.

Використання систем моніторингу представлено на рис.2 [12].

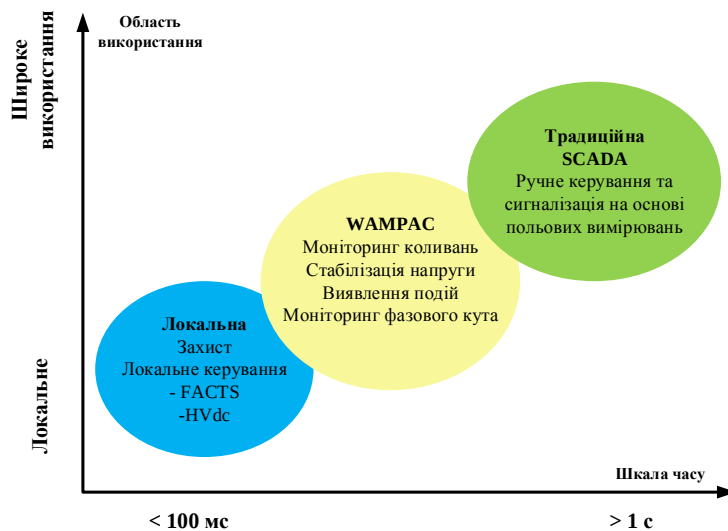


Рисунок 2 - Використання систем моніторингу

Застосування технології синхрофазора сприяло новим розробкам, які можна класифікувати за трьома категоріями: широкомасштабний моніторинг енергетичної системи (WAMPS), широкомасштабний захист енергетичної системи (WAPPS) і широкомасштабний контроль енергетичної системи (WAPSC) тощо у режимі реального часу та офлайн-ситуації [11, 14 – 18].

Wide area моніторинг енергосистеми (Wide area Power system monitoring, WAMPS)

Стан енергосистеми визначається як сукупність напруг прямої послідовності на всіх мережевих шинах, отриманих одночасно. Оцінка стану відіграє ключову роль у моніторингу та управлінні енергосистемами в режимі реального часу. Технологія оцінки стану, яка зараз використовується, була розроблена в 1970-х роках і базується на несинхронізованих вимірюваннях. Через низьку швидкість сканування та відносно повільні обчислення сучасна технологія не здатна надати інформацію про динамічний стан енергосистеми. Синхронізовані векторні вимірювання надають абсолютно нову можливість повторно відобразити весь процес оцінки стану.

Широкомасштабний захист енергосистеми (Wide area Power system protection, WAPSP)

Синхронізовані векторні вимірювання пропонують вирішення низки складних проблем захисту. Загалом вимірювання фазора є особливо ефективними для покращення функцій захисту, які мають відносно малий час відгуку. Перспективним застосуванням PMU є точне вимірювання імпедансу лінії, що є ключовим входним сигналом для визначення місця пошкодження.

Широкомасштабний контроль енергосистеми (Wide area Power system Control, WAPSC)

До запровадження фазорних вимірювань все управління в енергосистемі використовувало локальні вимірювання та математичну модель більшої системи. Було визнано, що такі контролери рідко були

оптимальними і могли виробляти абсолютно неприйнятні відповіді на системні явища, коли моделі були неточними. Типовими застосуваннями були проблеми, де цілі управління були глобальними за своєю природою: наприклад, контролер постійного струму високої напруги (HVDC) може бути використаний для гасіння електромеханічних коливань між двома широко розділеними областями енергосистеми.

Широкомасштабний контроль (Wide Area Controller, WAC)

Wide area контролер є централізованою частиною, яка є основним органом усієї архітектури розумної мережі широкої зони, яка отримала розумне керування завдяки своєму обчислювальному механізму та визначеним користувачем випадкам інформації. Завдяки цим ситуаціям WAC ідеально контролює електроенергетичну систему у виділеному регіоні через двосторонній зв'язок. Можуть бути розгорнуті Системи wide area контролю (Wide-area control systems, WACS), які перевищують функціональні можливості локального контролю та реагують швидше, ніж ручне керування з центру контролю. Окрім переваги швидкого контролю в надзвичайних ситуаціях, динамічний контроль набуває все більшого значення разом із розвитком швидкого контрольованого обладнання, такого як HVDC та FACTS.

Широкомасштабний захист (Wide-Area Protection, WAP)

Швидка еволюція систем широкомасштабного моніторингу (WAMS) дозволяє обробляти в режимі реального часу дані глобальних вимірювань для використання в програмах захисту системи. Виконуються всебічні дослідження Систем широкомасштабного захисту (Wide-Area Protection Systems, WAPS) з упором на розробку універсальних повністю автоматичних систем захисту, здатних справлятися з великими перешкодами та запобігати значним відключенням електроенергії у великих енергосистемах.

У всіх таких випадках існує потреба в захисті, яка складається з наступних факторів: класифікація завод; локалізація завод; ідентифікація та прогнозування порушень.

Моніторинг фазового кута (Phase Angle Monitoring, PAM)

Через PMU у реальному часі Фазовий кут різних вузлів відстежується точно, оскільки він синхронізований у часі, і точний PAM є дуже важливим для енергосистеми [18]. PAM забезпечує доступ у реальному часі до точної різниці фазових кутів між будь-якою парою шин. PAM дозволяє прогнозувати потенційні проблеми як на місцевому, так і на регіональному рівнях.

Моніторинг частот і швидкості зміни частоти

Частоту та швидкість зміни частоти можна виміряти за допомогою PMU. Зміна частоти може відображати зміну опору компонента системи живлення. Швидкість зміни частоти забезпечує стабільність вимірів [17].

WAMPAC пропонує численні переваги, такі як стабільність, надійність і безпека постачання. Крім того, це має економічний ефект, якщо система працює ближче до меж стабільності та потужності мережі, що призводить до збільшення передачі енергії. Дані вимірювань WAMPAC дозволяють здійснювати моніторинг у режимі реального часу, і його можна використовувати як систему раннього попередження для забезпечення стабільності системи, щоб обмежити діапазон і вплив збурень і запобігти знеструмленню системи енергопостачання.

Очікується, що системи WAMPAC в Україні покращать безпеку та надійність роботи енергосистеми на додаток до зниження завод та запобіганню знеструмлення.

Технології мікромережі (Microgrid) створюються шляхом інтеграції таких розподілених джерел енергії в комунальну мережу. Концепція мікромережі пропонується для створення автономної системи, що складається з розподілених енергетичних ресурсів, здатних працювати в ізолюваному режимі.

Незважаючи на те, що впровадження ЛЕС або мікромереж пов'язане з багатьма проблемами. Ці виклики можна структурувати наступним чином:

- Двонаправлений потік електроенергії – розподільний фідер був розроблений для потоку електроенергії в одному напрямку. Але ЛЕС які включають розосереджені генератори малої потужності, потужність перетікає в обох напрямках, що може призвести до ускладнення координації захисту, небажаної схеми потоку електроенергії.

- Проблеми з якістю електроенергії в системах змінного/постійного струму. Гармоніки, коливання напруги та частоти в мікромережі змінного струму, а також такі проблеми, як пусковий струм, циркуляційний струм, несправності шини постійного струму, пов'язані з мікромережею постійного струму, є основними проблемами в роботі системи.

- Низька інерційність. Мікромережа демонструє низьку інерційність, оскільки в основному містить розосереджені генератори з електронним інтерфейсом, які можуть покращити динамічну продуктивність системи. Але коли якщо вона працює в ізолюваному режимі, ця низька інерція може спричинити високу швидкість девіації частоти, якщо не вжити належних заходів контролю.

- Ізолюваний режим роботи - через несправності або падіння напруги робота ЛЕС змінюється з режиму підключення до мережі до роботи в ізолюваному режимі. У цій ситуації керування потоком електроенергії та керування напругою і частотою стає проблемою для надійної та ефективної роботи. Крім

того, проблеми з перевантаженням і низькою якістю електроенергії стають поширеними в автономному режимі роботи.

– Скоординоване керування декількома розподіленими джерелами живлення (РДЖ), які мають різні характеристики роботи та керування є складним. Тому належний контроль координації РДЖ також викликає велике занепокоєння.

– Варіанти накопичення енергії. ЛЕС, що має кілька РДЖ, в основному складається з відновлюваних джерел, які за своєю природою дуже переривчасті, тому для продовження електропостачання потрібні ефективні системи накопичення енергії. Крім того, це стабілізує дисбаланс навантаження та генерації та сприяє безпечній та надійній роботі Microgrid.

– Економічна та надійна робота - Економічна робота Microgrid разом із постійним значенням напруги та частоти є серйозною проблемою.

– Виклики технології та кібербезпеки. Наявність недорогих технологій для безпечної та надійної роботи, а також необхідність належного контролю та технології для інтеграції відновлюваних джерел є ключовим викликом. Потреба в швидкісних і точних обчислювальних пристроях і системі зв'язку є наступним викликом для надійної роботи Microgrid.

– Регуляторні бар'єри. Навіть сьогодні більшість органів регулювання ще не знайомі з концепцією Microgrid, а також не знають, як слід розвивати політику, пов'язану з Microgrid. Також деякі органи регулювання забороняють громадам здійснювати розвиток інфраструктури.

Технічні вимоги до роботи систем керування та систем моніторингу Microgrid зведені в стандартах. Так стандарт IEC TS 62898-3-2:2024 [19] описує надання технічних вимог до роботи систем керування мікромережею (СМК), а IEC TS 62898-3-4 [20] описує надання технічних вимог щодо моніторингу та керування мікромережами. Обидва стандарти поширюються на неізолювані або ізолювані мікромережі інтегровані з розподіленими енергетичними ресурсами для мікромереж низької і середньої напруги.

В IEC TS 62898-3-2:2024 відзначається основні функції систем керування [19]:

- керування потужністю та енергією серед різних ресурсів у мікромережі, включаючи потоки активної та реактивної потужності з різними часовими масштабами,
- потужність та енергетичні прогнози мікромережі,
- енергетичний баланс між енергетичними ресурсами вихідної мережі та мікромережі відповідно до прогнозу потужності та енергії, а також передових і місцевих обмежень,
- економічна та екологічна оптимізація,
- можливі сервісні потужності, такі як аукціони на ринку потужностей і прогноз стійкості: нові бізнес-моделі,
- архівація даних, звітування та оцінка продуктивності в різних режимах роботи.

СМК може мати деякі інші додаткові функції відповідно до розміру мікромережі та реальних випадків застосування, наприклад, управління тарифами та ринковою торгівлею та допоміжні послуги, такі як регулювання частоти, регулювання напруги, покращення якості та надійності електроенергії, можливості реагування на попит, зміна пов'язаних режимів роботи до систем моніторингу та керування мікромережею.

IEC TS 62898-3-4 присвячений стандартизації архітектури, функцій і роботи систем моніторингу та керування мікромережами (СМКМ). Основні функції [20]:

- Збір і обробка даних, включаючи збір даних у реальному часі з розподіленої генерації, навантаження, вимикачів, трансформаторів і пристроїв компенсації реактивної потужності, а також обчислення та аналіз отриманих даних.
- Керування базою даних, включаючи підтримку, синхронізацію, резервне копіювання, відновлення отриманих даних і забезпечення інтерфейсу даних з іншими внутрішніми та зовнішніми програмами.
- Людино-машинний інтерфейс, включаючи екран монітора в режимі реального часу та інтерфейс, який підтримує дистанційне керування, перемикання режимів, ручне введення даних тощо.
- Блокування та сигналізація для запобігання неправильній роботі, щоб заблокувати неправильну роботу на основі попередньо визначеного правила та логіки.
- Синхронізація часу, включаючи отримання сигналу синхронізації часу від Глобальної навігаційної супутникової системи або мережевого протоколу часу і синхронізацію часу кожного пристрою в межах мікромережі.
- Локальна оцінка якості електроенергії та можливість контролю за можливістю збору інформації про напругу поза межами, коефіцієнт потужності, гармоніку тощо та здійснення контролю для відповідного покращення якості електроенергії.
- Регулювання частоти/напруги під час стабільної роботи ізолюваної мікромережі для забезпечення напруги та частоти в прийнятному робочому діапазоні.
- Послідовність операцій або постійний перехід від вимкнення до запуску та від запуску до вимкнення.

- Комутаційне керування пристроями в мікромережах, включаючи вмикання та вимикання навантажень, генераційних установок, трансформаторів, пристроїв компенсації реактивної потужності тощо.

- Виявлення оточення, включаючи виявлення в режимі реального часу при відключенні електроенергії в системі розподілу вище за течією.

- Перехід режиму роботи, включаючи перехід з мережевого режиму в острівний режим і перехід з острівного режиму в мережевий режим.

- Контроль активної та реактивної потужності, включаючи відключення навантаження (якщо потрібно), розподіл навантаження та керування активною та реактивною потужністю в режимі реального часу відповідно до СМКМ або ручної команди.

- Здатність організації роботи джерел живлення та навантаження для підключення мікромереж з невідключеного стану.

- Інтерфейс із системою захисту або системою заземлення, коли необхідні адаптації відповідно до режимів роботи Мікромережі.

Для мікромережі, потужністю більше 100 кВт, система управління енергією та система моніторингу зазвичай розділені. Система моніторинг містить сервери даних, сервери додатків, робочі станції, маршрутизатори, пристрої захисту інформації, SCADA, система зв'язку, контролер розподіленої генерації, центральний контролер, контролер навантаження, пристрій інтерфейсу підключення до мережі та інше допоміжне обладнання. Для Microgrid менше 100 кВт на стороні споживача СКМ і СМКМ зазвичай об'єднуються в один вбудований пристрій із системою на кристалі, який називається контролером Мікромережі.

У загальному випадку Smart-моніторинг вирішує завдання як аналізу (оптимізації), так синтезу (проекування, планування, керування).

З точки зору «керуючих функцій» системи Smart-моніторингу мають враховувати, що сьогодні електроенергетична система є ієрархічною багаторівневою структурою, яка повинна діяти за принципом: підвищення інтелектуальності та зниження вимог до точності з підвищенням рангу ієрархії. Здійснюється двосторонній зв'язок з об'єктами, прогнозування управлінської технічної та фінансово-економічної діяльності, інтегрована інформаційно-аналітична підтримка, ідентифікація інформації.

Функції систем моніторингу:

- збір і обробка даних, включаючи збір даних у реальному часі щодо розподіленої генерації, навантаження, трансформаторів і пристроїв компенсації реактивної потужності, а також розрахунок і аналіз отриманих даних.

- керування базами даних, включаючи безпосередню обробку, синхронізацію, резервне копіювання та відновлення отриманих даних, а також забезпечення інтеграції даних з іншими внутрішніми та зовнішніми програмами.

- оцінка та контроль якості електроенергії (збір інформації про вихід за діапазон показників напруги, коефіцієнта потужності, гармонік тощо; відповідний контроль якості електроенергії).

- регулювання активної та реактивної потужності, включаючи відключення навантаження (в разі потреби), розподіл навантаження та контроль активної та реактивної потужності в режимі реального часу в автоматичному або ручному режимі.

При організації систем моніторингу ефективності роботи необхідно приділити увагу вирішенню наступних задач:

- балансування попиту та пропозиції;

- впровадження сучасних програм (механізмів) керування попитом (Demand Side Management);

- оцінка нерівномірності графіків енергоспоживання при електроживленні елементів ЛЕС як на змінному, так і постійному струмі.

На сьогодні розроблено два основні підходи до залучення споживачів до керування навантаженням: неявне керування попитом (implicit demand response, price-based demand response), засноване на застосуванні різних видів диференційованих за часом тарифів на електроенергію або поведінкових стимулів; явне керування попитом (explicit demand response, incentive-based demand response, event-based demand response), що передбачає безпосереднє керування навантаженням споживача [21 – 24].

Для організації роботи системи Smart-моніторингу необхідно провести:

- комплексний моніторинг електроенергії, енергетичного балансу та моніторинг потреб різних користувачів локальних системи.

- моніторинг роботи джерел розподіленої енергії та якості електроенергії, наприклад напруги, струму, потужності, частоти тощо (дані моніторингу можуть бути вибіркові, відповідно до умов роботи кожного джерела енергії).

- моніторинг навантаження: включаючи розподіл навантаження по окремим категоріям, наприклад, навантаження важливих користувачів, чутливих користувачів, великих користувачів тощо.

Науково-технічне обґрунтування застосування Smart-моніторингу електроенергетичної системи

середньої та низької напруги розглядається як нова якість у прийнятті управлінських рішень, тобто як комплексний та системний моніторинг, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів системи та системи в цілому. Нова якість та цінність такого моніторингу – це необхідність використання кількісної та якісної інформації, її систематизація.

Взаємодія розглянутих технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями DSM наведені на графіку (рис.3). Показано, що якщо системи WAMS та WAMPAC застосовуються на рівні високої та середньої напруги (оператори передачі електроенергії – Electricity Transmission Operators (TSO)), то сфера застосування Smart-моніторингу – середні та низькі напруги (оператори розподілу електроенергії – Electricity Distribution Operators (DSO)). Вирішена важлива задача організації ефективної взаємодії WAMS та WAMPAC (наприклад, з WAMS «РЕГІОН-Ч») з системами Smart-моніторингу на рівні середньої напруги. На горизонтальному (базовому) рівні Smart-моніторинг взаємодіє з такими системами (або є їх елементом) як систем керування розподіленням (DMS), розподілених системи керування енергетичними ресурсами (DERMS), систем керування енергоспоживанням (EMS), розширених систем керування розподілом (ADMS). Операційними складовими нижнього рівня для Smart-моніторингу є, зокрема, інтелектуальні електронні пристрої (Intelligent Electronic Devices, IED) та Smart лічильники.

Моніторинг і керування споживанням має дві різні мети. По-перше, з точки зору споживача або мешканця, наявність інформації про рівень використання приладів може призвести до зниження витрат через зменшення споживання енергії або можливих допоміжних послуг (запити на дисбаланс, регулювання навантаження або коливання цін на електроенергію тощо). По-друге, з точки зору інтелектуальної мережі або менеджера (агрегатора) мережі керованість більшою кількістю навантажень надає більше можливостей дій для підтримки стабільності мережі, тобто більшої гнучкості та надійності (зменшення пікового попиту шляхом усунення використання електроенергії, або шляхом перенесення його на непіковий час тощо) шляхом ідентифікації навантаження та прогнозування споживання енергії навантаженням.

Методологія Smart моніторингу передбачає застосування системи неінтрузивний моніторинг навантаження пристрою (Non-Intrusive Appliance Load Monitoring, NIALM) або неінтрузивний моніторинг навантаження (Non-Intrusive Load Monitoring, NILM) та складається з простішої апаратної частини та складнішого дезагрегування навантаження. Smart моніторинг передбачає розробку методів інтрузивного моніторингу та методів неінтрузивного моніторингу навантаження, необхідних для вирішення проблеми дезагрегування навантаження [22].

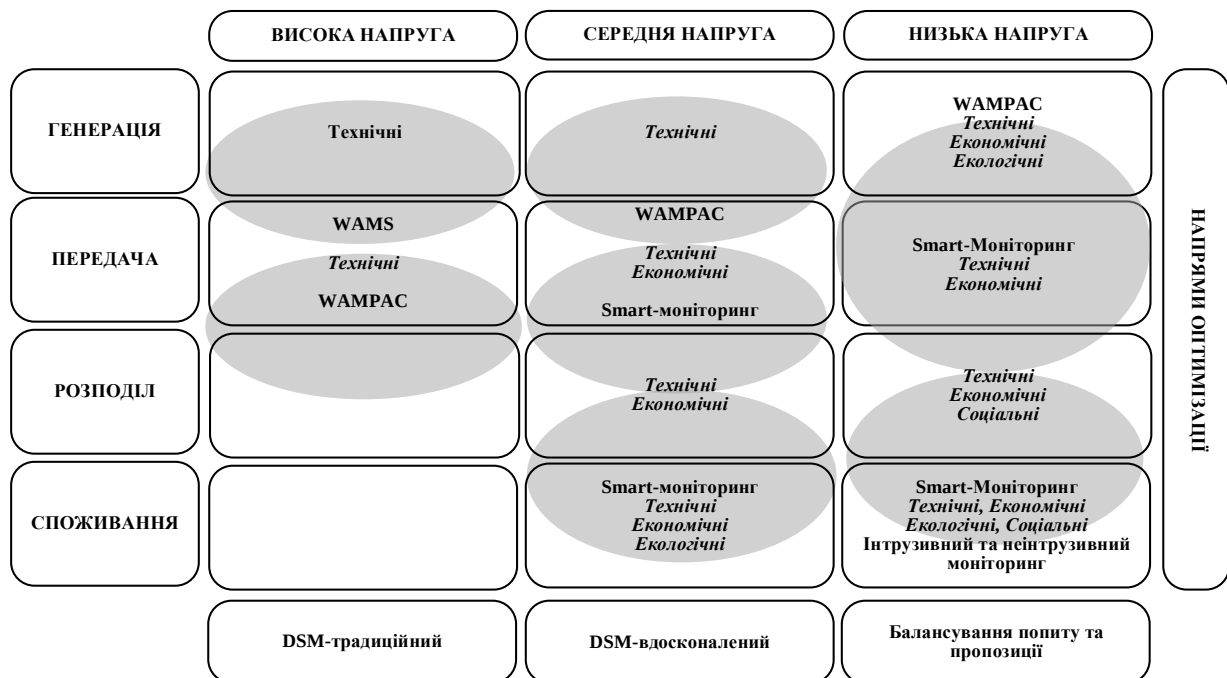


Рисунок 3 - Взаємодія технологій моніторингу та оптимізаційних задач з технологіями DSM

Розглянуті особливості та сфери застосування Smart-моніторингу, дало змогу скласти узагальний алгоритм Smart-моніторингу для оцінки технічних показників та участь у формуванні тарифів для участі на локальних ринках містить основні операції моніторингу, представлено на рис. 4.

Як додаткову складову Smart-моніторингу запропоновано здійснювати оцінку поточної економічної ефективності елементів ЛЕС, тобто Smart-моніторинг передбачатиме оцінку ефективності витрат первинного палива, економічної ефективності роботи альтернативних джерел енергії, систем акумулювання та навантажень, у тому числі й прогнозування генерації ними обсягів електроенергії та оцінки їх оптимальних рівнів.

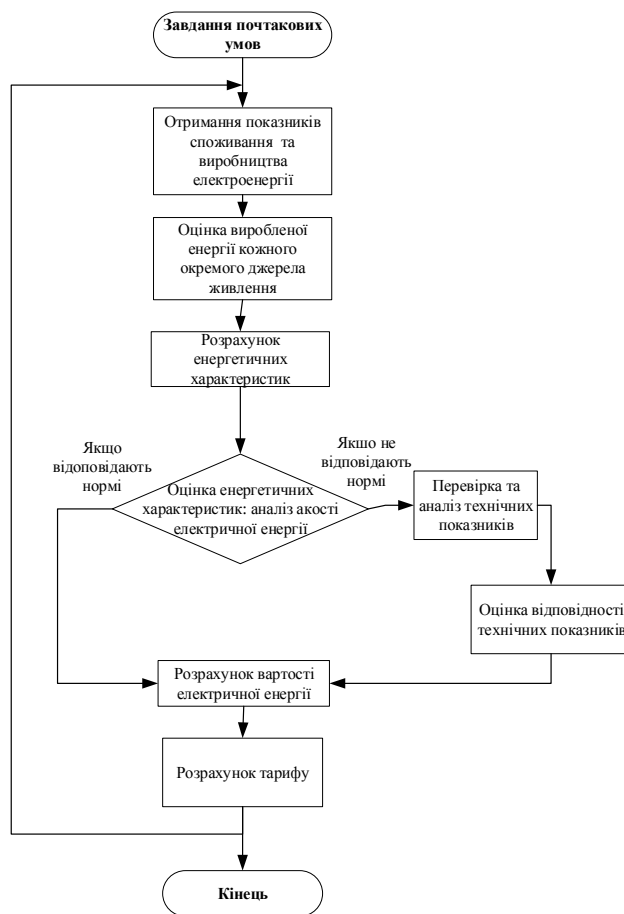


Рисунок 4

Алгоритм має наступні кроки:

1. Давачі в вузлах мікромережі/локальної електроенергетичної системи записують показники споживання та виробництва електроенергії, отримані дані зберігаються на серверах ЛЕС.
2. В системі моніторингу проводиться оцінка виробленої енергії кожного окремого джерела живлення з графіками залежностей витрат від генерованої потужності з урахуванням часу доби, пори року.
3. Розраховуються сумарні витрати на генерацію та енергетичні характеристики.
4. Виконується порівняння генерованої потужності та потужностей споживачів. Визначають показники якості електричної енергії та перевіряється відповідність стандартам. Проводиться оцінка витрат палива дизель-генераторів. При невідповідності нормам та стандартам проводиться аналіз технічних показників та їх оцінка, що впливатиме на формування тарифів.
5. Розрахунок вартості вироблення електроенергії загальної та по окремим генераторам.
6. Формування тарифної політики (динамічна тарифікація, тарифікація на добу наперед тощо) при функціонуванні системи на локальному ринку електроенергії.

Висновки.

WAMPAC має численні переваги, такі як стабільність, надійність і безпека постачання. Крім того, це має економічний ефект, якщо система працює ближче до меж стабільності та потужності мережі, що призводить до збільшення передачі енергії. Впровадження систем Smart-моніторингу сприяє оптимізації енергетичних процесів в ЛЕС, побудові децентралізованих систем енергозабезпечення, підвищенню їхньої енергоефективності, зокрема, розширенню стратегії технічного обслуговування на основі оцінки поточного стану об'єктів системи.

В рамках розвитку теорії моніторингу електроенергетичних систем запропоновано нову систему

принципів та процедур, покладених в основу побудови систем Smart-моніторингу сучасних електроенергетичних систем, зокрема, принципів побудови та реалізації Smart-моніторингу з поєднанням технічної (технологічної) та економічної ефективності.

Визначено, що Smart-моніторинг для ЛЕС з активними споживачами необхідно розглядати як комплексний системний Smart-моніторинг з розширеним функціоналом процедур, що на сучасному інноваційному рівні забезпечує спостереження поточної технологічної та економічної ефективності функціонування елементів ЛЕС, а при оцінюванні стану – виконання ідентифікації типу процесів.

Розроблено узагальнений алгоритм Smart-моніторингу для оцінки технічних показників та участь у формуванні тарифів, з урахуванням оцінки ефективності витрат первинного палива, економічної ефективності роботи відновлюваних джерел енергії, систем зберігання енергії та навантажень.

Список використаної літератури

1. Кириленко, О., С. Денисюк, і І. Білов. Цифрова трансформація енергетики: сучасні тенденції та завдання. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, вип. 65, Серпень 2023, с. 005, <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>.
2. Wójcik, W.; Lezhniuk, P.; Kaczmarek, C.; Komar, V.; Hunko, I.; Sobchuk, N.; Yesmakhanova, L.; Shermantayeva, Z. Integrated Assessment of the Quality of Functioning of Local Electric Energy Systems. *Energies* 2025, 18, 137. <https://doi.org/10.3390/en18010137>
- 3 C. Kim, H. Kim, S. Lee, J. Noh, E. Ghahremani and Y. Kim, "Enhancing Synchrophasor Reliability Through Network-Based Time Synchronization: KEPCO's Practical Approach," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 81-89, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3430888>.
- 4 H. Mohsenian-Rad, M. Kezunovic and F. Rahmatian, "Synchro-Waveforms in Wide-Area Monitoring, Control, and Protection: Real-World Examples and Future Opportunities," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 69-80, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3403800>
5. https://ec.europa.eu/info/news/clean-energy-all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en
6. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=>
7. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 62–69
8. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar, "Introduction to wide-area control of power systems," 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013, pp. 6758-6770, <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>.
9. Kyrylenko, O.V. & Stognii, B.S. & Denysiuk, S.P. & Sopel, M.F.. (2024). SMART-MONITORING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. 48-62. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>
10. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar. Introduction to wide-area control of power systems. 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013. Pp. 6758-6770. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>.
11. Xuemei Chen, Yang Jiang, Vladimir Terzija, Chao Lu. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.
12. J. R. Agüero, D. Novosel, D. Hart, A. B. Nassif, B. Enayati and C. R. Black, "Applications of Synchronized Measurement Technologies in Power Distribution Systems: Helping to Speed Up Technology Deployment," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 18-34, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3422975>
13. <https://www.regina.org.ua/Pages/WAMS.html>
14. N. Mira-Gebauer, C. Rahmann, R. Álvarez-Malebrán and V. Vittal, "Review of Wide-Area Controllers for Supporting Power System Stability," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 8073-8095, 2023, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237576>.
15. E. Rebello, L. Vanfretti and M. Shoaib Almas, "PMU-based real-time damping control system software and hardware architecture synthesis and evaluation," 2015 *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA*, 2015, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285812>.
16. Terzija, Vladimir & Valverde, Gustavo & Cai, Deyu & Regulski, Pawel & Madani, Vahid & Fitch, John & Skok, Srdjan & Begovic, M.M. & Phadke, Arun. (2011). Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 99. 80 - 93. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450>.
17. C. Martinez, M. Parashar, J. Dyer, and J. Corrao, "Phasor Data Requirements for Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Application," EIPP White Paper, Jan. 26, 2005, p. 8

18. M. S. Almas and L. Vanfretti, "Impact of time-synchronization signal loss on PMU-based WAMPAC applications," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA, 2016, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741313>.

19. IEC TS 62898-3-2:2024 - Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems Released: 9. 01. 2024 English language. 70 pages

20. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released: 8/25/2023. English language. 40 pages

21. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернечук І.С. Оптимізація енергопроцесів в системах енергозабезпечення з неінтрузивним моніторингом. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 3(90). С. 38–44. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.5>

22. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Гілевич К.М., Чернечук І.С.. Моніторинг ефективності роботи в локальних електроенергетичних системах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2024. Вип. 69. С. 46–56. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046>

23. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернечук І.С. Балансування навантажень в локальних електроенергетичних системах. *Електротехнічні та інформаційні системи*. 2024. № 106. С.

S. Denysiuk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

M. Sopol², Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-3438-5848

H. Bielokha¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4277-367X

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Small Private Enterprise "ANIGER"

FEATURES OF IMPLEMENTATION OF SMART-MONITORING IN ELECTRICITY GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION

The scientific theory of monitoring in the energy sector needs to be developed taking into account the tasks of energy transition, the implementation of the Smart Grid concept at the local level, in particular, at the local level of energy supply with distributed energy sources operating at low and, in some cases, medium voltage, where the tasks of monitoring and control are quite deeply interconnected and should reflect the various specifics of the construction and operation of dedicated LES. The scientific and technical justification for the use of Smart monitoring of the medium and low voltage electric power system is considered as a new quality in making management decisions, that is, as a comprehensive and systemic monitoring, which at the modern innovative level provides monitoring of the current technological and economic efficiency of the functioning of the system elements and the system as a whole. An analysis of global WAMS monitoring, its varieties and Smart monitoring is carried out. WAMS and WAMPAC systems are used at high and medium voltage levels (electricity transmission operators), while the scope of Smart monitoring is medium and low voltage. The interaction of the considered monitoring technologies and optimization tasks with DSM technologies is presented. To organize the operation of the Smart-monitoring system, it is necessary to carry out: comprehensive monitoring of electricity, energy balance and monitoring of the needs of various users of the local system; monitoring of the operation of distributed energy sources and electricity quality and load monitoring. A generalized algorithm for using Smart-monitoring to assess technical indicators and participate in the formation of tariffs for participation in local markets is presented.

Keywords: monitoring, microgrid, renewable energy sources, local electric power system, demand side management.

References

1. Kyrylenko, O., S. Denysiuk, and I. Blinov. Digital Transformation of Energy: Current Trends and Challenges. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 65, August 2023, p. 005, <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>.

2. Wójcik, W.; Lezniuk, P.; Kaczmarek, C.; Komar, V.; Hunko, I.; Sobchuk, N.; Yesmakhanova, L.; Shermantayeva, Z. Integrated Assessment of the Quality of Functioning of Local Electric Energy Systems. *Energies* 2025, 18, 137. <https://doi.org/10.3390/en18010137>

3 C. Kim, H. Kim, S. Lee, J. Noh, E. Ghahremani and Y. Kim, "Enhancing Synchrophasor Reliability Through Network-Based Time Synchronization: KEPCO's Practical Approach," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 81-89, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3430888>.

4 H. Mohsenian-Rad, M. Kezunovic and F. Rahmatian, "Synchro-Waveforms in Wide-Area Monitoring, Control, and Protection: Real-World Examples and Future Opportunities," in *IEEE Power and Energy Magazine*, ISSN 2308-7382 (Online)

vol. 23, no. 1, pp. 69-80, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3403800>

5. https://ec.europa.eu/info/news/clean-energy-all-europeans-package-completed-good-consumers-good-growth-and-jobs-and-good-planet-2019-may-22_en

6. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=>

7. Stogniy B.S., Sopel M.F. Fundamentals of monitoring in the electric power industry. On the concept of monitoring // *Tech. Electrodynamics*. – 2013. – No. 1. – P. 62–69

8. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar, "Introduction to wide-area control of power systems," 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013, pp. 6758-6770, <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>.

9. Kyrylenko, O.V. & Stognii, B.S. & Denysiuk, S.P. & Sopel, M.F.. (2024). SMART-MONITORING OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. 48-62. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>.

10. A. Chakraborty and P. P. Khargonekar. Introduction to wide-area control of power systems. 2013 American Control Conference, Washington, DC, USA, 2013. Pp. 6758-6770. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580901>

11. Xuemei Chen, Yang Jiang, Vladimir Terzija, Chao Lu. Review on measurement-based frequency dynamics monitoring and analyzing in renewable energy dominated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 155. Part B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109520>.

12. J. R. Agüero, D. Novosel, D. Hart, A. B. Nassif, B. Enayati and C. R. Black, "Applications of Synchronized Measurement Technologies in Power Distribution Systems: Helping to Speed Up Technology Deployment," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 18-34, Jan.-Feb. 2025, <https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3422975>

13. <https://www.regina.org.ua/Pages/WAMS.html>

14. N. Mira-Gebauer, C. Rahmann, R. Álvarez-Malebrán and V. Vittal, "Review of Wide-Area Controllers for Supporting Power System Stability," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 8073-8095, 2023, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237576>.

15. E. Rebello, L. Vanfretti and M. Shoaib Almas, "PMU-based real-time damping control system software and hardware architecture synthesis and evaluation," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285812>.

16. Terzija, Vladimir & Valverde, Gustavo & Cai, Deyu & Regulski, Pawel & Madani, Vahid & Fitch, John & Skok, Srdjan & Begovic, M.M. & Phadke, Arun. (2011). Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks. *Proceedings of the IEEE*. 99. 80 - 93. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450>.

17. C. Martinez, M. Parashar, J. Dyer, and J. Coroas, "Phasor Data Requirements for Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Application," *EIPP White Paper*, Jan. 26, 2005, p. 8

18. M. S. Almas and L. Vanfretti, "Impact of time-synchronization signal loss on PMU-based WAMPAC applications," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA, 2016, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741313>.

19. IEC TS 62898-3-2:2024 - Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems Released:9. 01. 2024 English language. 70 pages

20. IEC TS 62898-3-4:2023 - Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems Released:8/25/2023. English language. 40 pages

21. Denisyuk S.P., Bielokha H.S., Cherneschuk I.S. Optimization of energy processes in energy supply systems with non-intrusive monitoring. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. 2024. No. 3(90). P. 38–44. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.5>

22. Denisyuk S.P., Bielokha G.S., Gilevich K.M., Cherneschuk I.S.. Monitoring of work efficiency in local electric power systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2024. Issue 69. P. 46–56. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046>

23. Denisyuk S.P., Bielokha G.S., Cherneschuk I.S. Load balancing in local electric power systems. *Electrical and information systems*. 2024. No. 106. P.

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ЕНЕГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ МОЛОЧНОЇ ГАЛУЗІ

У статті розглянуто питання розробки системи енергетичного моніторингу для підприємств молочної галузі, що є актуальним у контексті підвищення енергоефективності виробництва та зниження витрат паливно-енергетичних ресурсів. Проаналізовано структуру енергоспоживання молокозаводів, виокремлено основні види енергоресурсів: електроенергію, пару, природний газ та воду. Розроблено концептуальну модель енергомоніторингу, яка передбачає багаторівневу систему збору даних із ключових джерел споживання та структурних підрозділів підприємства. Запропоновано інтеграцію автоматизованих засобів обліку для вимірювання параметрів енергоспоживання з високою частотою зчитування та подальшим агрегуванням інформації у 15-хвилинні інтервали. Система також враховує зовнішні фактори, що впливають на динаміку енергоспоживання, зокрема кліматичні умови та обсяг виробництва. Запропонована типова схема енергомоніторингу дозволяє формувати енергетичний баланс підприємства, відстежувати зміну показників у динаміці, своєчасно виявляти нераціональне використання ресурсів і забезпечувати основу для прийняття управлінських рішень. Впровадження системи сприятиме підвищенню енергоефективності, економічній та екологічній стійкості підприємств молочної промисловості. Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту в процеси аналізу та управління енергоспоживанням.

Ключові слова: аналіз енергоспоживання, енергомоніторинг, молокозавод.

Вступ. В умовах сучасного промислового розвитку раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів набуває вирішального значення для підтримки економічної стійкості підприємств та їх здатності конкурувати на ринку. Молочна промисловість, як один із ключових напрямів харчового виробництва, відзначається значними обсягами енергоспоживання, що зумовлено складною структурою технологічних процесів і високими вимогами до якості готової продукції.

Попри підвищений інтерес до проблем енергоефективності в Україні, більшість підприємств не мають системного підходу до оцінювання енергоспоживання. Зазвичай аналіз обмежується питомими або окремими показниками енергоефективності, що унеможливує повноцінну оцінку енергетичного стану підприємства. Відсутність комплексного моніторингу перешкоджає впровадженню ефективних енергозберігаючих заходів.

Необхідність енергетичного моніторингу регламентується міжнародними стандартами, такими як ДСТУ ISO 17741:2017 [1] та ДСТУ ISO 17743:2017 [2], які визначають засади вимірювання, аналізу, верифікації та звітності щодо енергетичних показників. Для досягнення ефективного управління енергоресурсами необхідно забезпечити постійний контроль параметрів енергоспоживання, систематичний аналіз використання ресурсів і організувати ведення документації, що відображає зміну енергетичних характеристик підприємства в динаміці.

Впровадження сучасних рішень у сфері енергомоніторингу сприяє скороченню витрат енергії, підвищенню загальної продуктивності, стабілізації функціонування обладнання, а також покращенню екологічної ситуації на виробництві. У зв'язку з цим, пошук нових методів та інструментів енергетичного моніторингу набуває особливої актуальності для підприємств молочної галузі та є важливим чинником їх сталого розвитку.

Мета та завдання. Метою роботи є розробка системи енергетичного моніторингу для підприємств молочної галузі з метою підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, зниження витрат та забезпечення сталого розвитку підприємств.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз енергоспоживання молокозаводами та визначення основних видів паливно-енергетичних ресурсів, що використовуються у виробничих процесах.

2. Розробка концептуальної моделі системи енергомоніторингу для молочних підприємств.

3. Визначення основних параметрів для здійснення енергетичного моніторингу на підприємствах молочної галузі.

4. Побудова типової моделі системи енергомоніторингу підприємств молочної галузі

Матеріал і результати досліджень.

Дослідження енергоспоживання на молочних підприємствах є важливим напрямом сучасної наукової думки. Ряд дослідників підкреслюють, що значний обсяг витрат на енергоресурси у харчовій промисловості зумовлює необхідність впровадження системного моніторингу та управління енергоспоживанням [3].

У роботах [4, 5] зазначено, що найбільш ефективні системи енергомоніторингу базуються на багаторівневій структурі збору даних з подальшим аналізом за допомогою цифрових технологій. Наприклад, у дослідженнях, присвячених впровадженню енергетичних інформаційних систем у промисловості Німеччини та Польщі, описано використання SCADA-платформ і систем прогнозування споживання для оптимізації режимів роботи обладнання.

У даній роботі враховано ці підходи при побудові типової моделі системи енергомоніторингу для підприємства молочної галузі. Зокрема, реалізовано багаторівневу архітектуру збору даних з основних джерел споживання енергії — електроенергії, природного газу, пари, води — та ключових споживачів.

Молочні підприємства є суттєвими споживачами паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), оскільки їхні виробничі процеси включають численні стадії обробки молока та виробництва молочної продукції. На молокозаводах використовуються такі ПЕР: електроенергія (для роботи технологічного обладнання (насоси, мішалки, сепаратори, гомогенізатори, фасувальні лінії), систем охолодження та заморожування, освітлення), пара (пастеризація, стерилізація, нагрівання води для виробничих процесів і санітарної обробки, підтримання мікроклімату), природний газ (виробництво пари в котлах, використання в сушильних установках), технічна холодна та гаряча вода (використання для миття обладнання, охолодження, опалення, інші технологічні потреби)

Нехай ПЕР молокозаводу складається зі скінченної множини R_0 , об'єктів R_i . $R_0 = \{R_i | i = \overline{1, m}\}$, де m — загальна кількість ПЕР що споживається молокозаводом. Кожен ресурс R_i характеризує скінченна множина факторів F_0 . Таким чином R_i може бути вираженим факторами $R_i = \{F_{ij} | j = \overline{1, n}\}$, де n — кількість факторів. Кожен фактор може бути вимірний системою моніторингу [6]. Перелік ресурсів та факторів зображено на рис. 1.

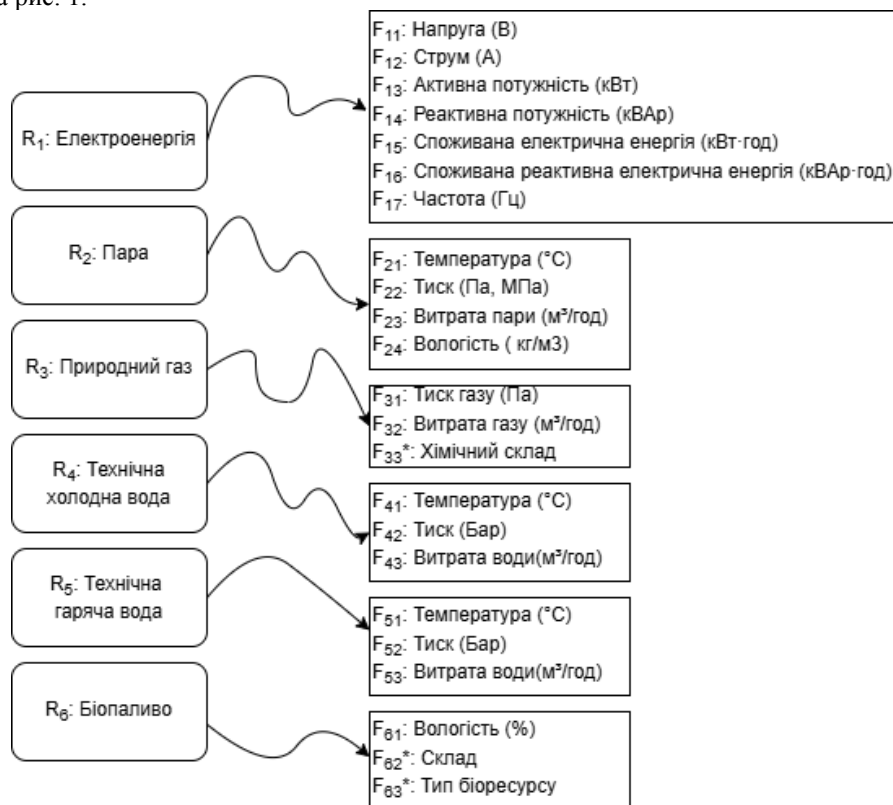


Рисунок 1 – Характеристики основних паливно-енергетичних ресурсів молокозаводу

Параметри, позначені зірочкою в таблиці 1, не передбачено вимірювати за допомогою автоматизованих засобів, оскільки вони зазвичай є сталими. Їх доцільно перевіряти періодично — орієнтовно раз на місяць або у разі зміни типу чи партії біопалива.

Моніторинг споживання електроенергії на підприємствах молочної галузі передбачає інтеграцію

вимірювальних засобів на всіх ключових ділянках енергоспоживання. Енергетична система повинна включати засоби обліку для кожного джерела живлення, та основного споживача енергії (рис 2). Такий підхід дає змогу формувати докладний електроенергетичний баланс підприємства, що дозволяє проводити аналіз ефективності використання електроенергії на рівні конкретних технологічних процесів або одиниць обладнання. Споживачі паливно-енергетичних ресурсів також можуть бути згруповані у структурні підрозділи. У такому разі вимірювальні прилади слід встановлювати на вході до відповідних підрозділів з метою формування енергетичного балансу, що відповідає організаційній структурі підприємства.

Передбачається використання автоматичних вимірювальних пристроїв [10], здатних реєструвати параметри електричної мережі, зокрема напругу, частоту, активну та реактивну потужність, із частотою збору даних кожну секунду. Для забезпечення аналітичної обробки та прогнозування ці дані агрегуються в 15-ти хвилинні інтервали, це дозволить відслідковувати зміни в процесах. Далі агреговані дані зберігаються в централізованій базі даних.

Для здійснення якісного контролю та аналітики споживання палива (природного газу або біопалива), води та пари на підприємстві доцільно передбачити встановлення відповідних вимірювальних приладів на основних ділянках їх використання. Зокрема, лічильники палива доцільно монтувати на вході до котельного обладнання, а засоби вимірювання пари та гарячої води — на виході з котлів. Це дає змогу визначати тепловий баланс котельної установки та оцінювати її енергетичну ефективність за допомогою розрахунку коефіцієнта корисної дії.

Окремі витрати води, що не пов'язані з роботою котельні, але використовуються безпосередньо у виробничих процесах, також мають обліковуватись за допомогою водомірів. У подальшому вимірювальні пристрої для контролю витрат води, пари та газу слід розміщувати за аналогією до електроенергії — на рівні окремих структурних одиниць та основних споживачів. Такий підхід забезпечує формування інтегрованого енергетичного балансу підприємства (рис. 2).

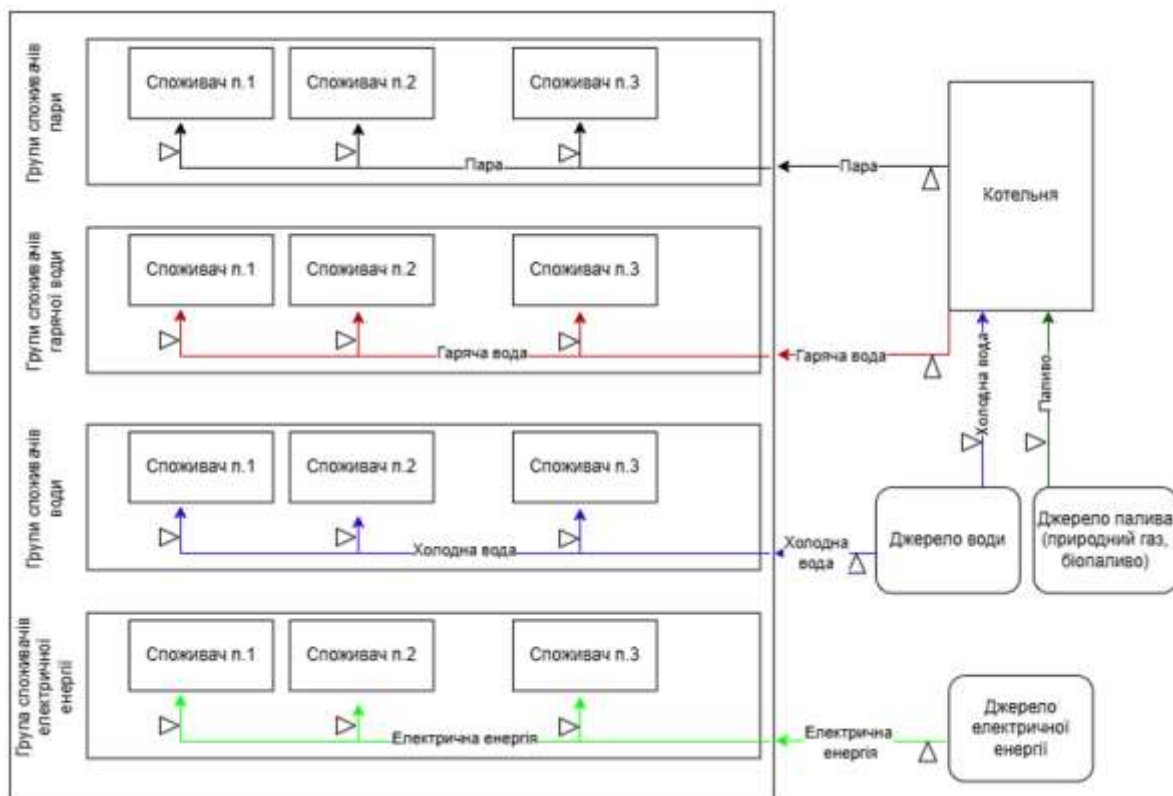


Рисунок 2 - Умовна схема моніторингу

Частота зчитування даних залежить від характеристик встановлених приладів обліку. У випадку обліку палива, води та пари фіксація даних зазвичай здійснюється щосекунди, після чого інформація агрегується в 15-ти хвилинні інтервали для подальшого аналізу, аналогічно до електричної енергії. Такий підхід дає змогу оперативно виявляти витрати, надмірне споживання ресурсів та впроваджувати заходи з їх оптимізації. Всі контрольовані параметри наведені у таблиці 1.

Окрім безпосереднього моніторингу показників енергоспоживання на молочному підприємстві, доцільним є також збір інформації про фактори, що впливають на витрати паливно-енергетичних ресурсів

або мають високу кореляцію з ними [7, 9]. Це дозволяє глибше аналізувати динаміку змін у споживанні енергії та покращувати точність прогнозів. Наприклад, холодильне обладнання та компресорні системи, які є одними з найбільших споживачів електроенергії, працюють з урахуванням зовнішніх кліматичних умов — зокрема температури повітря. Відповідно, реєстрація таких параметрів, як температура в приміщеннях (°C), вологість повітря (%) та обсяг виробництва продукції (кг/місяць) [11], дозволяє краще пояснювати коливання в енергоспоживанні.

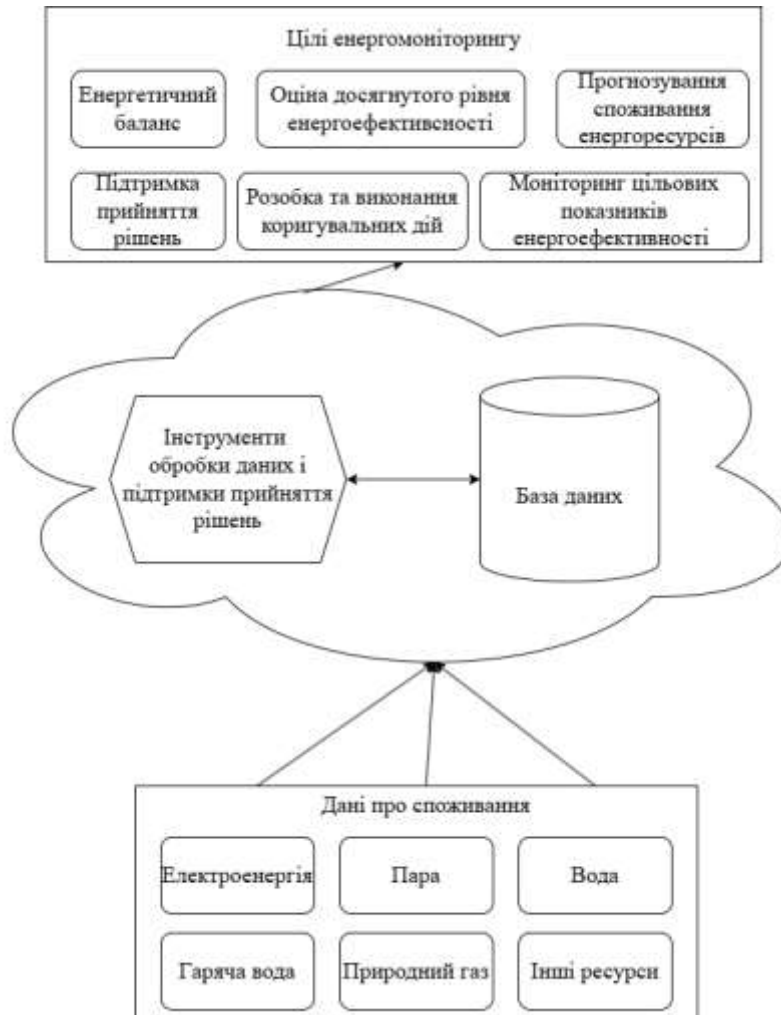


Рисунок 3 – Типова схема системи енергомоніторингу

В результаті типова система моніторингу буде виглядати так, як показано на рисунку 3. В математичному вигляді типову схему можна представити так:

$$f\left(\sum_{i,j=1}^{m,n} Ri(F_{ij})\right) = \sum_{k=1}^p G_k$$

Де $f\left(\sum_{i,j=1}^{m,n} Ri(F_{ij})\right)$ функція яка являє собою інструменти обробки даних та підтримки прийняття рішень, а $\sum_{k=1}^p G_k$ – цілі енергетичного моніторингу яких буде досягнуто.

Усі дані щодо використання паливно-енергетичних ресурсів, а також чинників, що впливають на їхнє споживання, будуть збиратися за допомогою відповідних вимірювальних пристроїв. Надалі ці дані агрегуються та зберігаються в базі даних для подальшої обробки. Аналізуючи цю інформацію, можливо досягти основних завдань енергомоніторингу: сформувати енергетичний баланс підприємства, визначити рівень енергоефективності, відстежувати динаміку цільових показників тощо [8, 12].

Висновки. У межах проведеного дослідження була розроблена концепція системи енергомоніторингу, орієнтованої на підприємства молочної промисловості. Запропонована система забезпечує комплексне управління енергетичними ресурсами завдяки впровадженню сучасних засобів автоматизованого збору даних, що дозволяє здійснювати своєчасний аналіз і прогнозування енергоспоживання.

Впровадження такої системи сприятиме зростанню енергоефективності підприємств, підвищенню їх екологічної та економічної стійкості, а також створить передумови для довгострокового управління енергетичними потоками. Перспективні напрямки подальших досліджень включають удосконалення методів аналізу даних, інтеграцію системи з автоматизованим управлінням виробництвом, а також використання алгоритмів штучного інтелекту для підтримки прийняття рішень.

Список використаної літератури

1. Загальні технічні правила вимірювання, розрахунку та верифікації обсягів енергозбереження в проєктах : ДСТУ ISO 17741:2017.
2. Енергозбереження. Визначення методологічної основи розрахунку та звітності щодо обсягів енергозбереження: ДСТУ ISO 17743:2017.
3. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Лунін М.М., Досвід створення та функціонування систем енергомоніторингу на муніципальних об'єктах. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2025. с. 7-13.
4. Андрійчук. А.А., Багаторівнева системи енергетичного моніторингу як інформаційний засіб системи енергетичного менеджменту птахофабрики Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ: НН ІЕЕ, 2021. с.60 – 63.
5. Антонюк В., Гарасимчук І., Потапський П., Структура багаторівневої системи моніторингу. Ефективне використання енергії: стан і перспективи. 2023. с. 295-297.
6. Розен В.П., Ячник Е.А., Лебедева О.В., Рейтингова оцінка рівня ефективності установ державного контролю з енергозбереження. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2008. с. 1-11.
7. Гоєнко А.О., Формування оптимальної енергетичної стратегії підприємств молочної галузі з урахуванням обмеженості енергопостачання : магістерська дисертація. Київ, 2023. 120 с.
8. Чернявський А.В., Якобчук Д.В., Інформаційно-аналітичні засоби моніторингу енергоефективності об'єктів нафтодобувної галузі. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. с. 106-111.
9. Гече Ф.Е., Мулеса О.Ю., Гриненко В.В., Смоланка В.Ю. Знаходження найвпливовіших факторних ознак при побудові лінійних регресійних моделей. Технологічний аудит та виробничі резерви, 3(2(47), 2019. Р. 20–25. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.175020>
10. Вимірювальні пристрої Simens. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products.html> (дата звернення 05.03.2025)
11. Чернявський А.В., Гоєнко А.О. Багатокритеріальний підхід до прийняття рішень щодо вибору оптимальної стратегії реалізації потенціалу енергозбереження на молокозаводах України. 7-ма міжнародна конференція ІЕЕЕ з енергорозумних систем. 2020. с. 418–423.
12. Коцар О., Карпенко А., Актуальні проблеми енергомоніторингу на муніципальних об'єктах. Енергетика і автоматика. 2022. с. 63-65.

A. Hoienko¹, Ph. D. student, ORCID 0009-0000-8896-2615

A. Cherniavskiy¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2858-8224

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

CONCEPTUAL MODEL FOR DEVELOPING AN ENERGY MONITORING SYSTEM FOR DAIRY INDUSTRY ENTERPRISES

The article addresses the development of an energy monitoring system for dairy industry enterprises, which is particularly relevant in the context of improving production energy efficiency and reducing fuel and energy resource consumption. The structure of energy consumption at dairy plants is analyzed, and the main types of energy resources are identified: electricity, steam, natural gas, and water. A conceptual model of energy monitoring has been developed, which provides a multi-level data collection system from key consumption sources and structural units of the enterprise. The integration of automated metering devices is proposed to measure energy consumption parameters with a high frequency of data reading, followed by aggregation into 15-minute intervals. The system also takes into account external factors influencing the dynamics of energy use, including climatic conditions and production volume. The proposed typical energy monitoring scheme enables the formation of the enterprise's energy balance, tracking of indicator changes over time, timely detection of inefficient resource use, and provides a foundation for informed managerial decision-making. The implementation of such a system will contribute to increased energy efficiency and to the economic and environmental sustainability of dairy industry enterprises. Future research prospects include the integration of artificial intelligence into energy consumption analysis and management processes.

Keywords: energy consumption analysis, energy monitoring, dairy plant.

References

1. General Technical Rules for Measurement, Calculation, and Verification of Energy Savings in Projects: DSTU ISO 17741:2017.
2. Energy Savings. Definition of the Methodological Basis for Calculation and Reporting of Energy Savings: DSTU ISO 17743:2017.
3. Nakhodov V.F., Borychenko O.V., Lunin M.M. Experience in Creating and Operating Energy Monitoring Systems at Municipal Facilities. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2025. pp. 7–13.
4. Andriichuk A.A. Multilevel Energy Monitoring System as an Informational Tool of the Energy Management System at a Poultry Factory. *Collection of Scientific Papers of the Educational and Research Institute of Energy Saving and Energy Management, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*. 2021. pp. 60–63.
5. Antonyuk V., Harasymchuk I., Potapyskyi P. Structure of a Multilevel Monitoring System. *Efficient Use of Energy: Current State and Prospects*. 2023. pp. 295–297.
6. Rozen V.P., Yachnyk E.A., Lebedieva O.V. Rating Assessment of the Efficiency Level of State Energy Saving Control Institutions. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2008. pp. 1–11.
7. Hoienko A.O. Formation of an Optimal Energy Strategy for Dairy Industry Enterprises Considering Energy Supply Limitations: Master's Dissertation. Kyiv, 2023. 120 p.
8. Cherniavskiy A.V., Yakobiuk D.V. Information-Analytical Tools for Monitoring the Energy Efficiency of Oil Production Facilities. *Energy: Economics, Technology, Ecology*. 2014. pp. 106–111.
9. Heche F.E., Mulesa O.Yu., Grynenko V.V. Identification of the Most Influential Factor Features in the Development of Linear Regression Models. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(2(47)), 2019. P. 20–25. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.175020>
10. Siemens Measuring Devices. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products.html> (accessed on 05.03.2025).
11. Cherniavskiy A., Hoienko A. A Multi-Criteria Approach to Decision-Making on Choosing the Optimal Strategy for Implementing the Energy-Saving Potential at Ukrainian Dairies. In *Proc. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. IEEE, 2020. pp. 418–423.
12. Kotsar O., Karpenko A. Current Issues of Energy Monitoring at Municipal Facilities. *Energy and Automation*. 2022. pp. 63–65.

Надійшла: 05.04.2025

Received: 05.04.2025

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ З РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У статті представлено методику комплексної оцінки енергоефективності насосного обладнання, оснащеного регульованими електроприводами. Розглянуто вплив частотного регулювання на енергоспоживання насосних установок у різних режимах експлуатації. Запропоновано алгоритм розрахунку питомого енергоспоживання з урахуванням технічних характеристик електропривода, гідравлічного навантаження та профілю споживання. Наведено приклади практичного застосування методики на основі експериментальних та модельних даних. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження регульованого електропривода як ефективного засобу підвищення енергетичної ефективності насосних систем. Розроблене програмне забезпечення може бути використана при техніко-економічному обґрунтуванні модернізації або проєктування нових об'єктів водопостачання, водовідведення та інших технологічних систем, що базуються на насосному обладнанні.

Застосування регульованого електроприводу, зокрема частотного перетворювача, дозволяє оптимізувати роботу насосів відповідно до змін навантаження, що сприяє зниженню енергоспоживання. Проте, для об'єктивної оцінки ефективності необхідний комплексний підхід, який враховує не лише зміну електроспоживання, але й гідравлічну ефективність, режимні характеристики, технічний стан обладнання та економічну доцільність інвестування у модернізацію.

Ключові слова: енергоефективність, насосне обладнання, регульований привід, частотне регулювання, гідравлічна ефективність, енергозбереження.

Вступ. Підвищення енергоефективності є пріоритетним напрямом розвитку сучасної енергетики та промисловості. Насосне обладнання, яке широко використовується у водопостачанні, тепlopостачанні, промислових і технологічних системах, споживає значну частку електроенергії. Застосування регульованого електроприводу (РЕП), зокрема частотного перетворювача, дозволяє оптимізувати роботу насосів відповідно до змін навантаження, що сприяє зниженню енергоспоживання. Проте, для об'єктивної оцінки ефективності необхідний комплексний підхід, який враховує не лише зміну електроспоживання, але й гідравлічну ефективність, режимні характеристики, технічний стан обладнання та економічну доцільність інвестування у модернізацію [1, 2, 3].

Постановка задачі дослідження. Надлишковий тиск на напірній лінії насоса створюється при його дроселюванні затвором, засувкою або іншим пристроєм. На подолання цього тиску додатково витрачається енергія. Регулювання кутової швидкості насоса замість дроселювання відбувається без додаткового витрачання енергії на подолання надлишкового тиску [4, 5].

Завдяки зняттю надлишкового тиску потужність (кВт), спожита насосом, зменшується на величину

$$\Delta N = 10^3 \frac{Q \Delta H}{\eta}, \quad (1)$$

де Q – продуктивність, м³/с; ΔH – надлишковий тиск, МПа; η – ККД насоса.

Напірна характеристика відцентрового насоса визначається рівнянням

$$H_H = H_\Phi \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 - S_\Phi Q^2, \quad (2)$$

де H_Φ і S_Φ – фіктивна висота водопідйому й гідравлічний опір насоса; Q – його продуктивність (рис.1).

Надлишковий тиск при частоті обертання насоса, яка дорівнює номінальній $n = n_{\text{ном}}$:

$$\Delta H = H_\Phi - S_\Phi Q^2 - H_\Pi - S_Q Q^2 = H_\Phi - H_\Pi - (S_\Phi + S) Q^2.$$

Позначимо $\Delta H_\Phi = H_\Phi - H_\Pi$, а гідравлічний опір насоса і трубопроводу виразимо через фіктивну висоту водопідйому насоса, а також максимальну для даної установки продуктивність

$$S_\Phi = \frac{H_\Phi - H_\Pi}{Q_\Phi^2}, \quad S = \frac{H_\Pi - H_\Pi}{Q_\Pi^2}.$$

Тоді

$$S_{\Phi} + S = \frac{H_{\Phi} - H_{\Pi}}{Q_B^2}.$$

Підставляючи значення ΔH_{Φ} і $S_{\Phi} + S$ у рівняння (2), одержуємо

$$\Delta H = \Delta H_{\Phi} (1 - (Q/Q_B)^2). \quad (3)$$

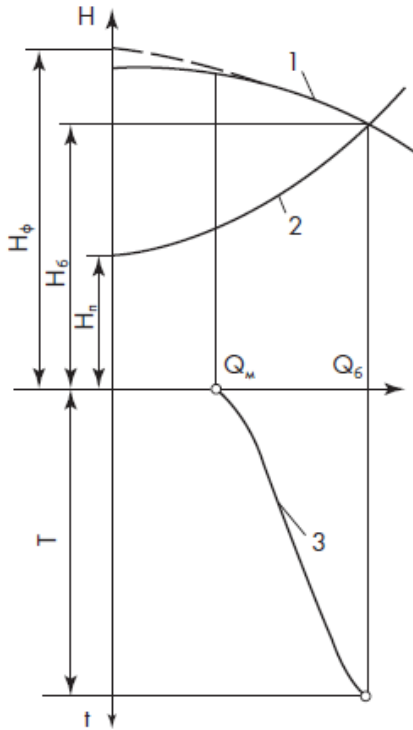


Рисунок 1 – Графік суміщеної роботи насоса з трубопроводом та впорядкована діаграма подачі води:
1 – напірна характеристика насоса, 2 – характеристика трубопровода, 3 – впорядкована діаграма водоподачі

Виразимо залежність продуктивності насоса від часу

$$\frac{Q - Q_M}{t} = \frac{Q_B - Q_M}{T}.$$

Звідси

$$Q = \frac{Q_B - Q_M}{T} t + Q_M.$$

Позначаючи $\lambda = \frac{Q_M}{Q_B}$, одержимо

$$Q = Q \left[(1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right]. \quad (4)$$

Підставляючи в рівняння (1) і (3) значення продуктивності з (4), а потім значення ΔH з (3) – в рівняння (1), одержимо залежність

$$\Delta N = 10^3 \frac{Q_B}{\eta} \Delta H_{\Phi} \left[\left[(1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right] - \left[(1 - \lambda) \frac{t}{T} + \lambda \right]^3 \right]$$

Виконавши алгебраїчне перетворення, одержимо вираз Δ

$$N = 10^3 \frac{Q_B}{\eta} \Delta$$

$$H_{\Phi} \left[\lambda (1 - \lambda^2) + (1 - \lambda) (1 - 3\lambda^2) \frac{t}{T} - 3(1 - \lambda)^2 \lambda \frac{t^2}{T^2} - (1 - \lambda)^3 \frac{t^3}{T^3} \right]$$

Праву і ліву частини отриманого виразу помножимо на ∂t , а потім інтегруємо в межах від 0 до T

$$W_{EK} = \int_0^T \Delta N dt = 10^3 \frac{Q_B}{\eta} \Delta H_{\Phi} T \frac{1}{4} \left\{ (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}. \quad (5)$$

Після перетворень одержуємо вираз

$$W_{EK} = \int_0^T 10^3 \frac{Q_B H_B}{\eta} T \left\{ \frac{H_{\Pi}}{H_B} \left(\frac{1}{H_{\Pi} / H_{\Phi}} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}, \quad (6)$$

або

$$W_{EK} = N_B T \left\{ H_{\Pi}^* \left(\frac{H_{\Phi}^*}{H_{\Pi}^*} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}, \quad (7)$$

де $N_B = 10^3 Q_B H_B / \eta$ – спожита насосом потужність, кВт (Q , м³/с; H , МПа); H_{Π}^* і H_{Φ}^* – відносні протитиск і фіктивна висота водопідйому. Для водопровідних насосів і насосів систем тепlopостачання зазвичай $H_{\Phi}^* = 1,25$, отже формула (7) набуває вигляду

$$W_{EK} = N_B T \left\{ H_{\Pi}^* \left(\frac{1,25}{H_{\Pi}^*} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) [2 - (1 + \lambda^2)] \right\}. \quad (8)$$

Рівняння (5) – (8) дозволяють обчислити економію енергії, одержувану зняттям надлишкового тиску.

За своїми енергетичними характеристиками РЕП поділяються на 3 основні групи [1]

- електроприводи (ЕП) з втратами ковзання (приводи з гідравлічними й електромагнітними муфтами ковзання, електродвигуни з реостатом у колі ротора);
- ЕП з рекуперацією енергії ковзання (асинхронно-вентильні, електромеханічні каскади);
- ЕП, які регулюються без втрат ковзання (частотні приводи (ЧРП), вентильні (ВД)).

Наведена коротка класифікація показує, що втрати в ЕП першої і другої груп значною мірою визначаються втратами ковзання [6, 7].

Втрати ковзання в ЕП істотно залежать від режиму роботи насосної установки і, як наслідок, від тих само параметрів, від яких залежить економія енергії.

Основні результати дослідження Розроблено програмне забезпечення (ПЗ) для оцінки енергетичної та економічної ефективності використання РЕП в системах тепло- водопостачання, призначене для роботи на персональному комп'ютері (ПК) в середовищі операційної системи Windows. Дане ПЗ розраховує доцільність використання основних видів РЕП, а саме ЧРП, ВД, муфти ковзання, асинхронно-вентильного каскаду в залежності від конкретних параметрів (потужності насоса, його ККД, глибини регулювання, відносного протитиску в системі, виду ЕП, ККД ЕП, ККД перетворювача, кількості працюючих насосів, періоду роботи насосної установки, вартості РЕП, цін на електроенергію, ставки дисконтування, очікуваного строку життя проекту).

Головне вікно ПЗ (рис. 2), куди необхідно ввести технічні параметри насосної установки (потужність насоса, ККД насоса, глибину регулювання, значення відносного протитиску в системі, виду ЕП, кількості працюючих насосів). В ПЗ закладені узагальнені значення ККД ЕП та перетворювачів, але якщо користувачу відомі конкретні значення цих параметрів, то він може ввести їх натиснувши на кнопку “Додаткові параметри” форми введення технічних даних.

Технічні дані установки

Номинальна потужність агрегату, кВт:

Глибина регулювання:

☐ Глибина регулювання невідома

Максимальна витрата води, куб.м/с:

Мінімальна витрата води, куб. м/с:

Відносний протитиск, МПа:

☐ Відносний протитиск невідомий

Протитиск у системі, МПа:

Напір, що відповідає максимальній продуктивності, МПа:

Вид привода:

- ☐ усі види приводів
- ☐ Асинхронний з короткозамкненим ротором
- ☐ Асинхронний із фазним ротором
- ☐ Синхронний

Число працюючих агрегатів, штук:

ККД насоса:

☐ з урахуванням змінів приводу

Додаткові параметри

Далі

Рисунок 2 - Вікно для введення технічних характеристик установки

Економічні параметри

Період опалення, год:

Ставка дисконтування, відс.:

Вартість електроенергії, грн./кВт*година:

Очікуваний термін життя проекту, років:

Коефіцієнт амортизації, відс.:

Вартість обладнання, грн.

Частотний:

Каскад:

Муфта ковзання:

Вентильний:

Рисунок 3 - Вікно для вводу фінансових показників

Для того, аби отримати інформацію про фінансову оцінку конкретного виду РЕП, треба натиснути на відповідні вкладки. При натисненні на вкладку “Порівняння результатів” користувач отримує порівняльну таблицю фінансової оцінки різних видів ЕП (рис. 4, 5).

Розрахунок ефективності застосування регульованого приводу в системах з...

Економія енергії при застосуванні різних видів регульованого приводу

Частотно - регульований привід, кВт * год / рік	75362
Муфта ковзання, кВт * год / рік	50241
Асинхронно-вентильний каскад кВт*год/рік	59099
Вентильний двигун, кВт * год / рік	73365

Довідка: порівняльний аналіз типів електроприводів

Назад Далі

Рисунок 4- Вікно з результатами розрахунків економії для різних видів РЕП

Розрахунок ефективності застосування регульованого приводу в системах опалення.

Фінансова оцінка проектів

Частотний | ABK | Муфта ковзання | Вентильний двигун | Порівняння результатів

	Частотний	ABK	Гідромуфта	Вентильний
Термін окупності, міс	33 міс.	35 міс.	38 міс.	37 міс.
Дисконтований термін окупності, міс	139 міс.	42 міс.	45 міс.	44 міс.
Чистий наведений прибуток, грн.	16381	10753	7370	11981
Внутрішня норма рентабельності, відс.	35	32	29	30

Назад Графіки

Рисунок 5 - Вікно фінансової оцінки проектів

ПЗ дає змогу отримати графіки залежності фінансових показників (чистої приведенної вартості (NPV), внутрішньої норми рентабельності (IRR), строку окупності, дисконтованого строку окупності) від параметрів (потужності, глибини регулювання, відносного протитиску, кількості насосів, тарифа на електроенергію, ставки дисконту, строку життя проекту, періоду опалення, коефіцієнту амортизації) для різних видів РЕП (рис. 6). ПЗ надає можливість роздрукувати звіт з інвестиційної оцінки заходу.

За допомогою графіків залежності NPV від суттєвих параметрів, побудованих ПЗ, отримуємо можливість порівняння області застосування ЧРП та ВД в залежності від зміни одного з цих параметрів (рис. 7 – рис. 12).

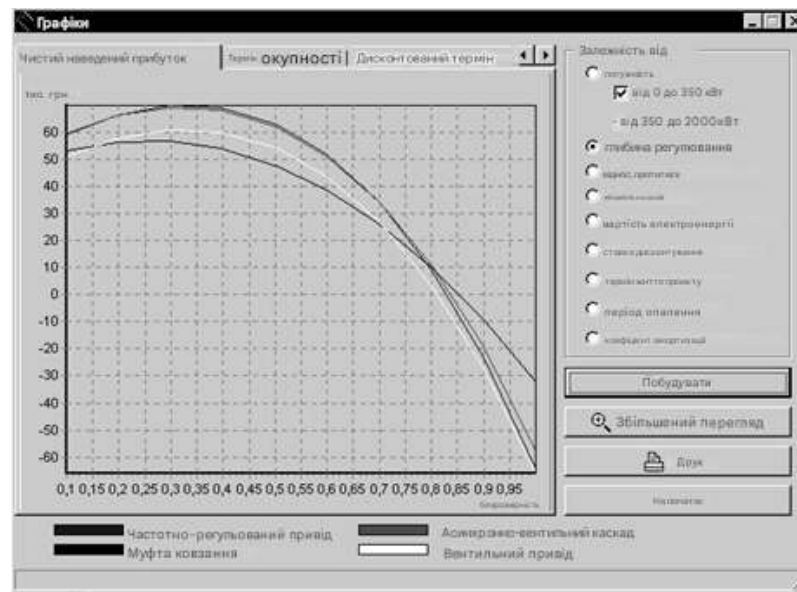


Рисунок 6 – Вікно фінансових показників в залежності від діапазону вхідних параметрів

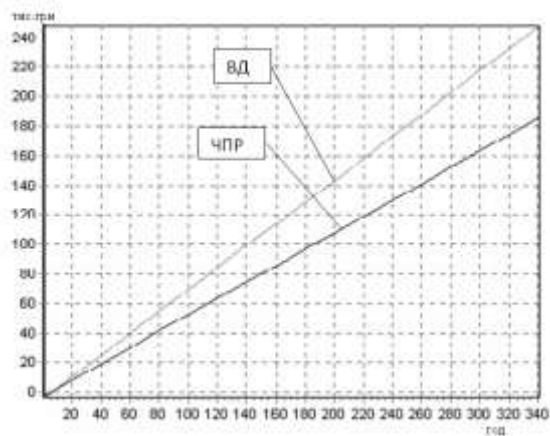


Рисунок 7 - Залежність NPV від потужності ЕП

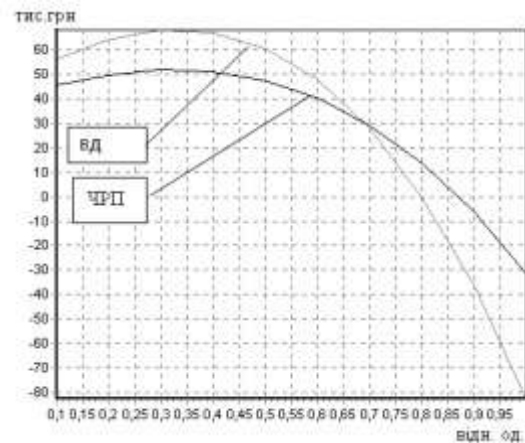


Рисунок 8 - Залежність NPV від глибини регулювання

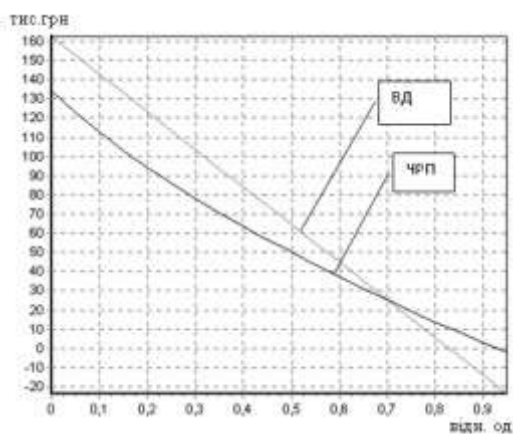


Рисунок 9 - Залежність NPV від відносного протитиску

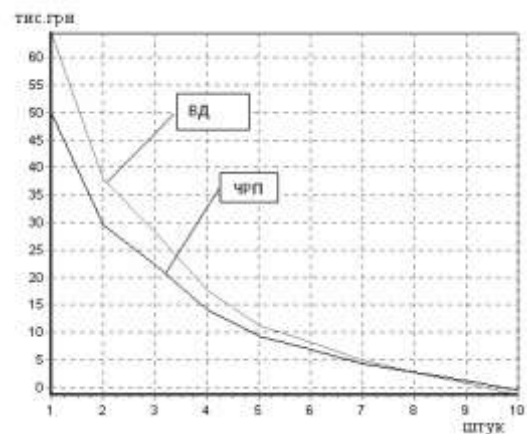


Рисунок 10 - Залежність NPV від кількості паралельно працюючих насосів

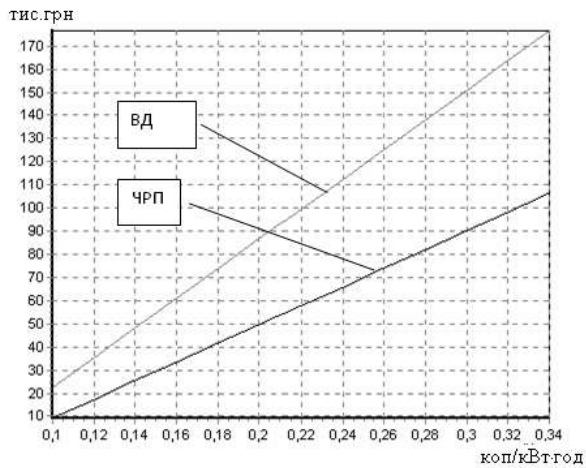


Рисунок 11 - Залежність NPV від ціни на електроенергію

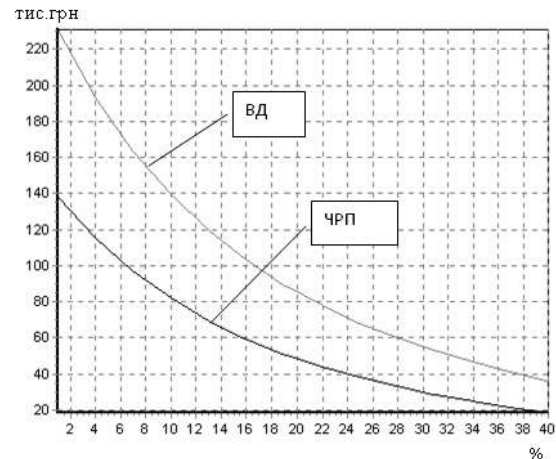


Рисунок 12 - Залежність NPV від ставки дисконтування

Висновок. Розроблено методику та ПЗ для оцінки енергетичної та економічної ефективності використання РЕП в системах тепло- водопостачання, призначене для роботи на ПК в середовищі операційної системи Windows. ПЗ розраховує доцільність використання основних видів РЕП, а саме ЧРП, ВД, муфти ковзання, асинхронно-вентильного каскаду в залежності від конкретних параметрів (потужності насоса, його ККД, глибини регулювання, відносного протитиску в системі, виду ЕП, ККД ЕП, ККД перетворювача, кількості працюючих насосів, періоду роботи насосної установки, ціни на РЕП, тарифу на електроенергію, коефіцієнта амортизації, ставки дисконтування, очікуваного строку життя проекту).

Особливістю ПЗ є те, що воно дозволяє отримати графіки залежності фінансових показників (NPV, IRR, строку окупності, дисконтованого строку окупності) від параметрів (потужності, глибини регулювання, відносного протитиску, кількості насосів, ціни на електроенергію, ставки дисконту, строку життя проекту, періоду опалення, амортизації) для приведених типів РЕП.

Результати дослідження підтверджують високу чутливість фінансових показників до зміни ключових техніко-економічних параметрів. Це вказує на доцільність використання запропонованого ПЗ як інструменту підтримки прийняття рішень при проектуванні або модернізації насосних станцій з урахуванням конкретних умов експлуатації.

Методика та ПЗ можуть бути ефективно використані в рамках енергетичного аудиту, при техніко-економічному обґрунтуванні інвестицій, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з енергоменеджменту та автоматизації технологічних систем.

O. Zakladnyi¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko¹ Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF PUMPING EQUIPMENT WITH ADJUSTABLE DRIVE

The article presents a methodology for comprehensive assessment of the energy efficiency of pumping equipment equipped with variable-speed drives. The influence of frequency control on the energy consumption of pumping systems under various operating conditions is analyzed. An algorithm for calculating specific energy consumption is proposed, taking into account the technical characteristics of the drive, hydraulic load, and consumption profile. Practical application examples of the methodology are provided based on experimental and simulation data. The results obtained confirm the feasibility of implementing variable-speed drives as an effective means of improving the energy efficiency of pumping systems. The proposed methodology can be used for the techno-economic justification of modernization or the design of new facilities for water supply, wastewater treatment, and other technological systems based on pumping equipment.

The use of a regulated electric drive, in particular a frequency converter, allows you to optimize the operation of pumps in accordance with changes in load, which helps reduce energy consumption. However, for an objective assessment of efficiency, a comprehensive approach is required, which takes into account not only changes in electricity consumption, but also hydraulic efficiency, operating characteristics, technical condition of the equipment and the economic feasibility of investing in modernization.

Keywords: energy efficiency, pumping equipment, variable speed drive, frequency control, hydraulic efficiency, energy saving.

References

1. O. M. Zakladnyi, A. V. Prakhovnyk, and O. I. Solovei, *Energy Saving in Industrial Electric Drives: A Textbook*. Kyiv: Kondor, 2005, 408 p.
2. O. O. Zakladnyi, "Energy efficiency of a brushless motor," *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 4(58), pp. 99–105, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200507>.
3. O. M. Zakladnyi and O. O. Zakladnyi, *Energy-Efficient Electric Drive with Brushless Motors* (in Ukrainian), 2nd ed., revised and extended. Kyiv: Libra Publishing House, 2013, 212 p. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70374>.
4. Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units: Background and Methodology. Dr.-Ing Bernd Stoffel, Elsevier, 2015 – 158 p.
5. Optimizing Pumping Systems: A Guide to Improved Energy Efficiency, Reliability, and Profitability, Hydraulic Institute, 2008, -254p.
6. Pumps and pumping system. Bureau of Energy Efficiency pp 113-134, Government of India, Ministry of Power, 2024.
7. Pump System Energy Efficiency Optimization Management and Technical Guide, SAARS energy center, 2021 – 16p.

Надійшла: 15.04.2025

Received: 15.04.2025