

ЗМІСТ

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

- С.П. Денисюк, К.М. Гілевич.** Оптимізація використання розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах за критерієм мінімуму втрат електроенергії..... 7
- Д.Г. Дерев`яно, В.В. Воробель.** Підвищення ефективності функціонування Microgrid систем з накопичувачами..... 22
- Г.С. Белоха, М.О. Тараба.** Транзактивні локальні електроенергетичні системи: особливості функціонування та перспективи розвитку..... 29

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- Є.О. Микита, В.І. Дешко.** Розподільний облік теплової енергії на опалення багатоквартирних будинків: технічні, методичні, поведінкові аспекти..... 38
- В.І. Троханяк, О.В. Шеліманова, С.Є. Тарасенко, А.С. Баліцький.** Дослідження бічної системи вентиляції в пташнику за допомогою CFD..... 47
- В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, Г.О. Гетманчук.** Параметричний аналіз природного повітрообміну в багатоквартирних житлових будівлях..... 57

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

- Д.А. Яковлев.** Інтелектуальна мультисенсорна система для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання з використанням Wi-Fi..... 69
- А.О. Новиков, В.М. Сліденко.** Нелінійна модель рекуперативного амортизаційного пристрою..... 76
- В.С. Бойко, О.В. Шкардун.** Напруга на силових електричних вентилях трифазного мостового компенсаційного перетворювача з однією комутуючою ланкою..... 83
- С.В. Зайченко, Р.Д. Куліш.** Вплив частоти діагностування резервного джерела живлення на надійність електропостачання..... 89

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

- Т.В. Бібік, І.А. Остапенко, В.Г. Гончарук.** Методика отримання іонізуючого випромінювання на основі ефекту гальмівного випромінювання..... 97
- Т.П. Нечасва.** Цільові показники низьковуглецевого розвитку електроенергетики України..... 103
- В.В. Кирик, Є.О. Штефирца.** Європейська офшорна мережа з вітровими електростанціями..... 112
- М. Абдулхамід.** Проектування системи телевимірювання електроенергії з використанням мікроконтролерного пристрою через GSM..... 119
- В.А. Пешко, С.Р. Лішук.** Управління витратою палива енергоблока 200 МВт при роботі в режимі частих пусків..... 128

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

- М.В. Гребченко, І.І. Кирушок.** Розв'язання системи рівнянь стану електричної мережі з дефектом ізоляції або з однофазним замиканням на землю..... 134
- В.П. Калінчик, О.В. Бориченко, В.В. Калінчик, О.В. Мейта, В.А. Побігайло.** Управління режимами напруги як засіб регулювання навантаження..... 139
- А.В. Волошко, В.В. Шевчук.** Ідентифікація та класифікація однофазних провалів напруги за методологією просторового вектору кутової частоти..... 145

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ

- В.В. Яценко, К.О. Могильна.** Економічні та соціальні аспекти створення автономних енергетичних регіонів в Україні..... 150

CONTENTS

SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- S. Denysiuk, K. Hilevich.** Optimization of the use of distributed energy resources in local electrical power systems according to the criterion of minimum loss of electricity..... 7
- D. Derevinko, V. Vorobel.** Performance efficiency increase of the microgrids with energy storage systems..... 22
- H. Bielokha, M. Taraba.** Transactive local electrical energy systems: functioning features and development prospects..... 29

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

- Y. Mykyta, V. Deshko.** Distribution accounting of heat energy for heating of apartment buildings: technical, methodological, behavioral aspects..... 38
- V. Trokhaniak, O. Shelimanova, S. Tarasenko, A. Balitsky.** Research of the side ventilation system in the poultry house using CFD..... 47
- V. Deshko, I. Bilous, H. Hetmanchuk.** Parametric analysis of natural air exchange in multi-apartment residential buildings..... 57

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

- D. Yakovlev.** An intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment using Wi-Fi..... 69
- A. Novykov, V. Slidenko.** Non-linear model of a recuperative shock absorber..... 76
- V. Boiko, O. Shkardun.** Voltage on the power electric diodes of a three-phase bridge compensation converter with one commutating link..... 83
- S. Zaychenko, R. Kulish.** Influence of diagnostics frequency of backup power supply on the reliability of electricity supply..... 89

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

- T. Bibik, I. Ostapenko, V. Goncharuk.** The method of obtaining ionizing radiation based on the effect of brake radiation..... 97
- T. Nechaieva.** Target indicators of ukraine's low-carbon power sector development..... 103
- V. Kyryk, Y. Shtefyrtsa.** European offshore network with wind power plants..... 112
- M. Abdulhamid.** Design of Electrical Power Telemetry System Using Microcontroller Device Via GSM..... 119
- V. Peshko, S. Lishchuk.** Management of fuel consumption of 200 mw power unit when operating in frequent start-up mode..... 128

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- M. Grebchenko, I. Kyrushok.** Solution of the system of state equations of an electrical network with an insulation defect or with a single-phase ground fault..... 134
- V.P. Kalinchyk, O. Borychenko, V.V. Kalinchyk, O. Meita, V. Pobigaylo.** Control of voltage modes as a means of load regulation..... 139
- A. Voloshko, V. Shevchuk.** Identification and classification of single-phase voltage dips using the methodology of the spatial vector of angular frequency..... 145

ECONOMIC ASPECTS OF ENERGY

- V. Yatsenko, K. Mohylna.** Economic and social aspects of the creation of autonomous energy regions in Ukraine..... 150

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 620.9

DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290880

С.П. Денисюк¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

К.М. Гілевич¹, аспірантка, ORCID 0000-0001-9074-0683

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Анотація. Розглянуто питання оптимізації використання розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах (ЛЕС) за критерієм мінімуму втрат електроенергії. Визначено, що важливим кроком оптимізації використання розосереджених енергетичних ресурсів в ЛЕС є розробка енергетичного роутера, який дозволяє на низькій напрузі об'єднувати в єдину систему пристрої, що генерують, накопичують і споживають електроенергію (без інтеграції в електричні мережі середньої напруги). Власне енергороутер може позиціонуватися як базовий пристрій, який забезпечує роботу ЛЕС, взаємодію сусідніх ЛЕС на рівні енергетичного та інформаційного обміну, інтеграцію конкретних ЛЕС до розподільних електричних мереж середньої напруги.

Показано, що базовою складовою оцінки ефективного функціонування енергороутерів та платформеного підходу в ЛЕС, відповідно до вимог Енергетичного Інтернету, є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, а також формування відповідних критеріїв енергоефективності та оцінки парціального впливу елементів ЛЕС. Запропоновано здійснювати опис енергетичних процесів при декомпозиції реактивної потужності Фризе з виділенням реактивного та активного струму в контрольованих перетинах системи. Розглянуто декомпозицію потужності Q_F на складові при дії різних причин (факторів) виникнення додаткових втрат електроенергії в ЛЕС, зокрема, обумовлених різними режимами роботи генераторів та навантажень ЛЕС (спектрами напруги та струму), як на періоді роботи системи, так і за довільний проміжок часу, що визначається технологічними факторами роботи системи.

Використання потужності Фризе дозволило з єдиних позицій врахувати процеси енергозабезпечення навантажень ЛЕС на змінному та постійному струмі, зокрема, для оцінки впливу сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії; співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений контрольований перетин, коли напрямок потоку електроенергії є незмінним чи напрямок потоку електроенергії змінюється протягом окремих інтервалів часу; аналізу втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем, де введено модифіковані потужності, як інтегральні оцінки нев'язки, яка визначає вплив спотворюючих факторів; оцінки впливу зміни напруги та струму в перетині ЛЕС обмеженої потужності на складові додаткових втрат; аналізу зміни споживання навантаженням активної потужності за першою гармонікою та за вищими гармоніками як інтегральними показниками.

Ключові слова: локальні електроенергетичні системи, розосереджені енергетичні ресурси, Енергетичний Інтернет, енергетичний роутер, енергетичні процеси, потужність Фризе, фактори спотворення енергоспоживання, складові втрат електроенергії, оптимізаційні процедури.

Вступ

Основною технічною проблемою, яка виникає при практичному використанні джерел розосередженої генерації (ДРГ) обмеженої потужності у складі ЛЕС, є узгодження режимів виробництва та споживання енергії [1 – 6]. Сумірність потужностей генеруючих джерел та споживачів в ЛЕС призводить до погіршення якості вихідної напруги в періоди піків електричного навантаження, неефективного використання ДРГ, включаючи й відновлювані джерела енергії (ВДЕ), що знижує загальний рівень надійності та стабільності електропостачання споживачів [7, 8]. Більшість наявних в експлуатації ЛЕС з ДРГ є технічно готовими виробами, адаптованими під певний тип енергетичного обладнання, які не допускають розширення їх функціональних можливостей та нарощування потужностей за рахунок підключення нових генеруючих установок [7, 8]. На ринку локальних електроенергетичних

систем виникла потреба в універсальних технічних пристроях, що забезпечують можливість об'єднання в рамках «Інтернет енергії» (Internet of Energy) різнотипних енергетичних установок з можливістю оцінки їх ефективності та оптимального (квазіоптимального) керування режимами їхньої роботи. Як наслідок, зазначена проблематика визначила актуальність вирішення науково-технічної проблеми ефективного застосування ЛЕС змінного та постійного струму [8, 9].

Одним із важливих кроків у напрямку розвитку Енергетичного Інтернету є розробка енергетичного роутера, який дозволяє на низькій напрузі об'єднувати в єдину систему пристрої, що генерують, накопичують і споживають електроенергію (без інтеграції в електричні мережі середньої напруги) [8–10]. Фактично енергороутер може позиціонуватися як базовий пристрій, який забезпечує роботу ЛЕС, взаємодію сусідніх ЛЕС (на одному ієрархічному рівні) на рівні енергетичного та інформаційного обміну, інтеграцію конкретних ЛЕС до розподільних електричних мереж середньої напруги.

Створення комбінованих ЛЕС з ДРГ, як постійного, так і змінного струму, вимагає вирішення науково-технічної проблеми оцінки ефективності передачі та перетворення електроенергії та керування цими процесами за певними законами, які забезпечують їхню високу енергетичну ефективність [10–12]. При цьому важливо проаналізувати характер протікання енергетичних процесів, які забезпечують можливість раціонального об'єднання у складі ЛЕС різнотипних ДРГ та формування ефективних режимів їх роботи залежно від зміни у часі доступної генерованої та споживаної потужності у випадку наявності широкого спектру технологій енергоспоживання, коли також є успішним застосування енергетичного роутера [8–10].

Важливим елементом оптимізації енергетичних процесів в ЛЕС є формування відповідної платформи взаємодії (керування), направленої на досягнення ефективності функціонування ЛЕС за дотримання балансу потужності при мінімізації втрат електроенергії. Можемо виділити наступні сценарії використання платформи в оперативному керуванні [13, 14]:

- 1) керування попитом (цінозалежне зниження споживання);
- 2) керування віртуальною електростанцією;
- 3) керування розосередженою системою накопичувачів;
- 4) комерційна диспетчеризація споживачів;
- 5) керування ЛЕС в цілому;
- 6) диспетчеризація парку станцій зарядки електротранспорту;
- 7) диспетчеризація ділянок Smart Grid;
- 8) керування ЛЕС з врахуванням вимог локальних енергоринків.

Платформенний підхід відкриває широкий спектр нових можливостей для підвищення якості керування інфраструктурою ЛЕС, її стійкості та надійності [11–13]. Так, система керування ЛЕС має забезпечити безперервний контроль її працеспроможності в умовах безперервної динаміки та постійних змін параметрів зовнішніх умов та, звичайно, з урахуванням факторів впливу. Крім класичних для електроенергетики задач оптимізації режимів електроенергетичних систем, вибору оптимального складу робочого обладнання або конфігурації мережі, ЛЕС вимагають вирішення завдань оптимального планування роботи також накопичувачів електроенергії, оцінки ризиків при керуванні попитом, оптимізації використовуваних агрегаторами ресурсів. Усі ці оптимізаційні завдання мають свою специфіку, зокрема [14–16]:

– формуються та вирішуються на різних часових проміжках: від кількох хвилин у завданнях керування потужністю при вторинному регулюванні частоти до тижнів і місяців у задачах планування експлуатації;

– мають різні критерії мінімізації реактивної потужності, втрат електроенергії у мережі, відхилень напруги від номінальних значень, сукупних витрат на генерацію, а також максимізації сукупного прибутку окремих учасників локальних енергоринків;

– включають різні набори і типи змінних (двійкові, цілочисельні, безперервні, лінгвістичні);

– наявність систем прогнозування.

При побудові високоефективних ЛЕС висуваються різні вимоги щодо точності та оперативності (від кількох секунд у завданнях оптимізації поточного функціонування ЛЕС до днів та місяців у завданнях планування складу клієнтів агрегаторів), зокрема, мають враховуватися [15–18]: керування складом та режимами роботи ДРГ; керування навантаженням; керування накопичувачами електроенергії. Для цього застосовуються:

1) засоби силової електроніки для керування реактивною потужністю та напругою, конфігурацією системи;

2) системи та об'єкти, зовнішні щодо ЛЕС, включаючи численні взаємні зобов'язання між учасниками – складні багатоставкові та мультizonні тарифи на електроенергію та потужність;

3) штрафи за відхилення від заявленого споживання;

4) зобов'язання щодо участі в наданні системних послуг тощо.

Також доцільно врахувати невизначеність майбутнього – різні сценарії зміни обсягів генерації,

споживання, ринкових цін та інших значимих параметрів.

Важливою складовою ефективного функціонування енергорутерів та платформеного підходу є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, формування відповідних критеріїв енергоефективності та парціального впливу елементів ЛЕС [18–21].

Мета роботи. Оцінка ефективності функціонування енергорутерів в ЛЕС, відповідно до вимог платформеного підходу і Енергетичного Інтернету, та аналіз складових втрат електроенергії, обумовлених роботою генераторів і навантажень з виділенням техніко-економічних (цінових) та технологічних факторів.

1. Особливості використання енергетичних роутерів в ЛЕС

Впровадження великої кількості установок ВДЕ в ЛЕС згідно концепції Smart Grid, відомі як інтелектуальні мережі, докорінно змінить парадигму керування енергією. Ефективне керування попитом і пропозицією енергії в мережі вимагає енергетичних роутерів, які динамічно регулюють розподіл енергії в мережі, що можна назвати Енергетичним Інтернетом [5]. Енергетичний Інтернет можна визначити як інноваційний підхід до керування електроенергією, заснований на використанні інтелектуальних електричних мереж, які інтегрують виробництво, передачу, зберігання, споживання та ринки електроенергії [8].

Нижче представимо основні характеристики Енергетичного Інтернету, які обумовлюють особливості функціонування енергорутера [9]:

1. **Відкритий доступ.** Енергетичний Інтернет забезпечує платформу для відкритого доступу до різних видів енергії. Зберігання та використання розосереджених енергетичних ресурсів та пристроїв може здійснюватися локально в рамках Енергетичного Інтернету, а торгові платформи та ринки електроенергії в ньому є відкритими.

2. **Можливість взаємодії з різними енергетичними мережами.** Енергетичний Інтернет використовує електричну енергію як основне джерело енергії, але також інтегрує інші види, зокрема, хімічну та теплову енергію. Різні електроенергетичні мережі можуть бути поєднані в мережу Енергетичного Інтернету для забезпечення диверсифікованого споживання енергії.

3. **Розподіленість.** Енергетичний Інтернет характеризується широкомасштабною децентралізацією розосереджених енергетичних ресурсів та пристроїв зберігання енергії, які інтегруються в систему попиту. Це вимагає використання технологій розподіленого контролю та оптимального керування енергією, що забезпечує реалізацію інтелектуального керування енергією.

4. **Еквівалентність.** Енергетичний Інтернет порушує традиційну структуру електромереж, включаючи виробництво, передачу, розподіл та використання електроенергії. Він дозволяє виробникам та споживачам енергії взаємодіяти між собою без обмежень, оскільки виробництво та споживання енергії можуть бути багатосторонніми чи двонаправленими.

5. **Можливість спільного використання.** Енергетичний Інтернет забезпечує швидкий і точний обмін інформацією в режимі реального часу за допомогою передових комунікаційних технологій. В енергетичному інтернеті можна обмінюватися різними енергетичними параметрами, такими як напруга, струм і потужність, а також параметрами портів і розподілом потоків енергії.

Оскільки інтелектуальна електромережа є комплексною модернізацією існуючих енергетичних систем і включає в себе багато нових функцій, таких як використання ВДЕ та інтелектуальне керування енергоспоживанням, яке допомагає оптимізувати використання енергії, відповідно функціонал інтелектуальної мережі можна розділити на сім областей: генерація великої потужності, передача, розподіл, експлуатація, ринок, клієнти та постачальники послуг [6]. Енергетичний роутер є ключовим технологічним компонентом інтелектуальної мережі, який допомагає забезпечити її роботу.

Основні функції енергетичного роутера: керування потоками електроенергії розподільних електричних мереж 10, 20 кВ у мережу 0,4 кВ; керування потоками електроенергії в мережі 0,4 кВ (зі споживачами, розосередженою генерацією та пристроями накопичення); зв'язок з іншими енергорутерами для об'єднання ЛЕС у Smart Grid; передача надлишків електроенергії з мережі 0,4 кВ із ДРГ в розподільні електромережі 10, 20 кВ. Керування потоками електроенергії передбачає: передача та розподіл електроенергії з району електромереж 10, 20 кВ споживачам 0,4 кВ; передача електроенергії споживачам 0,4 кВ та накопичувачам електроенергії; передача (продаж) надлишків електроенергії від власних джерел іншим споживачам 0,4 кВ та накопичувачам електроенергії; передача (продаж) надлишків електроенергії від ДРГ та власних джерел у район електромереж 10, 20 кВ; використання електроенергії пристроїв накопичення.

Позитивні ефекти від впровадження енергорутерів [10–12]:

- електричних мережі (зниження пікових навантажень);
- споживачі, які мають труднощі з підключенням внаслідок енергодефіциту (отримання надлишку потужності для підключення нових споживачів);
- споживачі зі «складною» структурою мереж низької напруги (впорядкування процесів передачі,

розподілу та споживання електроенергії);

– застосування енергорутера в ЛЕС у мегаполісах (отримання надлишку потужності для підключення нових споживачів, підвищення надійності електропостачання, підвищення якості електроенергії, що відпускається);

– застосування енергорутера в районах з високим потенціалом ВДЕ (інтеграція ВДЕ в розподільні електромережі 10, 20 кВ, можливість споживачам здійснювати продаж електроенергії).

Використання енергетичних роутерів в мережах зі здатністю до інтелектуального керування розглянемо з використанням поняття «домен» у розумінні група чи множина [9 – 11]:

1. Домен генерації великої потужності передбачає собою виробництво електроенергії з розосереджених енергоресурсів, які зазвичай пов'язані з локальними навантаженнями. Електроенергія, що перевищує локальний попит, надходить до енергетичної системи через мережу енергетичних роутерів. Під час локального дефіциту енергії, мережа забезпечує достатні обсяги енергії через енергетичний роутер.

2. Домен передачі електроенергії забезпечує передачу електроенергії від джерел генерації до споживачів. Оскільки енергоресурси є розосередженими, домен передачі повинен за допомогою енергетичного роутера диспетчеризувати енергію від джерел, які мають надлишок після задоволення локальних потреб, з метою забезпечення динамічних енергетичних потоків.

3. Домен мережі розподілу електроенергії залежить від енергетичних роутерів, які забезпечують адаптацію розподілу енергії до змін попиту користувачів з часом.

4. Оптимізаційний домен енергетичної мережі необхідний для збору інформації про поточний стан мережі, включаючи потужності виробництва енергії з розосереджених джерел та потреби в енергії від різних споживачів. Цю інформацію можна отримати від енергетичних роутерів, які використовуються в операційних доменах передачі та розподілу електроенергії.

5. Ринковий домен спрямований на забезпечення балансу між попитом та пропозицією, інформація про попит та пропозицію електроенергії має бути зібрана з різних частин електроенергетичної системи, щоб забезпечити її належну роботу. Для цього необхідні енергетичні роутери, розгорнуті в електроенергетичній системі, які забезпечують збір необхідної інформації.

6. В домені споживача, споживачі отримують електроенергію через енергетичні роутери. Якщо споживачі також генерують електроенергію з ВДЕ, то енергорутери регулюють попит та пропозицію електроенергії для споживачів, які до них підключені. Якщо загальний обсяг електроенергії, вироблений споживачами, перевищує їхній власний попит, то надлишок може бути проданий назад в електромережу через енергетичні роутери, що допомагає автоматизувати ринкові процеси.

7. Домен постачальника послуг: для оптимізації своїх послуг постачальники повинні отримувати актуальну інформацію про попит та пропозицію електроенергії. Вони можуть отримати цю інформацію з власних об'єктів виробництва енергії або від сторонніх ВДЕ. Для збору інформації підключаються енергетичні роутери.

Можливі способи застосування енергетичного роутера в Енергетичному Інтернеті зображено схемою на рис. 1, де показано три типи застосування, а саме: ЛЕС, стандартні навантаження та електромобілі [22]. В лівій частині рис. 1 показано, що ЛЕС містить ВДЕ, таку як сонячна енергія та енергія вітру.

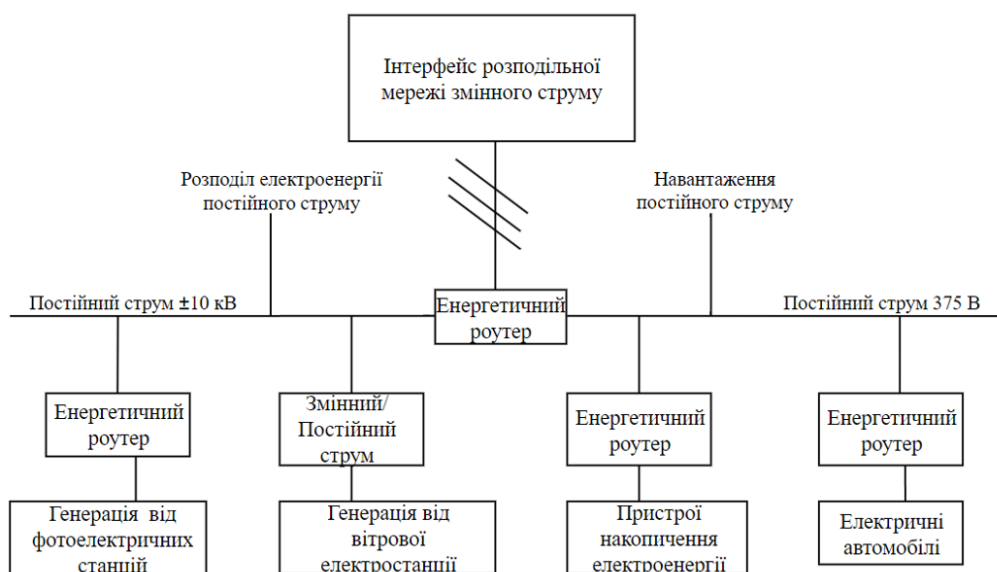


Рисунок 1 – Застосування енергетичного роутера в Енергетичному Інтернеті

За допомогою енергетичного роутера, що використовується для керування енергетичними потоками, ЛЕС може бути підключена до Енергетичного Інтернету [22]. У центральній частині рис. 1 зображено стандартні навантаження, такі як побутові електроприлади та промислові машини. Застосування енергетичного роутера дозволяє регулювати та контролювати енергетичний потік до стандартних навантажень для забезпечення ефективного використання енергії. У правій частині рис. 1 показано, що енергетичний роутер може бути використаний для зарядки електромобілів. Роутер може регулювати енергетичний потік до станцій зарядки електромобілів, щоб забезпечити ефективне та стабільне заряджання. Узагальнюючи можемо стверджувати, що рис. 1 демонструє потенційні застосування енергетичного роутера в різних сферах, допомагаючи забезпечити стабільну та ефективну роботу Енергетичного Інтернету [22].

При встановленні енергороутера у гібридній ЛЕС з АС / DC, яка містить вітрогенератор, сонячні панелі та звичайний дизель-генератор, основною функцією його є регулювання потоку електричної енергії між цими різними джерелами енергії та споживачами. Він також регулює накопичення надлишкової енергії, що була вироблена від вітрогенератора та сонячних панелей, у батареї для подальшого використання.

Енергетичний роутер є складовою інтелектуальної електромережі та відіграє ключову роль у контролі за електроенергією, що дозволяє ефективно керувати нею в електроенергетичній системі. Розробка цього пристрою потребує інтеграції технологій силової електроніки, передачі даних та автоматизації. Розглянемо нижче всі необхідні технічні аспекти при проектуванні енергетичного роутера [22, 23]. Для автоматичного розподілу та ефективного керування електроенергією в енергетичному роутері необхідним є застосування пристроїв силової електроніки. Ці пристрої «збирають» інформацію про попит та пропозицію електроенергії в режимі реального часу з мережі і динамічно коригують розподіл електроенергії в залежності від цієї інформації. Для цього силова електроніка використовується як інтерфейс між інтелектуальним модулем керування та силовим трансформатором в енергетичному роутері. Швидка та надійна робота пристроїв силової електроніки є необхідною умовою, щоб забезпечити правильне виконання команд, які видає інтелектуальний модуль керування [22, 23].

Також результат роботи енергетичного роутера залежить від того, які дані він отримує від мережі. Наприклад, при зростанні локального навантаження роутер може використовувати фотоелектричну систему для вироблення електроенергії, а коли пристрій не працює належним чином, то він вимикає її. Щоб забезпечити правильну роботу мережі, зв'язок між енергетичними роутерами має відповідати конкретним вимогам, наведеним нижче. Мінімізації затримки передачі даних. Необхідно забезпечувати швидку передачу даних між енергетичними роутерами, зокрема, затримка обміну даними має визначати максимальний час, за який повідомлення має досягти свого призначення. Вимоги до затримки в мережі можуть відрізнятися залежно від типу подій, що викликають ці повідомлення [23].

В інтелектуальних електричних мережах найбільш критичні за часом повідомлення потребують максимальної затримки доставки до 3 мс. Тому необхідно забезпечити енергетичному роутеру технічно швидку обробку та передачу даних для зменшення часового діапазону, як опрацювання даних, так і подальшої передачі. Наступним важливим етапом у програмуванні енергетичного роутера постає необхідність забезпечити надійний зв'язок між енергетичними роутерами, що досягається завдяки проектуванню роутерів з урахуванням мінімізації ймовірності збоїв.

Також необхідно забезпечити функцію виявлення збоїв зв'язку, що дозволяє швидко ретранслювати втрачені повідомлення для їх повторної передачі. Щоб забезпечити безпеку обміну даними між енергетичними роутерами, важливо задіяти належні механізми безпеки, які запобігатимуть несанкціонованому доступу та зміні інформації, що передається. Фальсифіковані або підроблені повідомлення можуть поставити під загрозу роботу електроенергетичної системи [22, 23].

Енергетичні роутери повинні мати модуль «розподіленого мережевого інтелекту», щоб приймати обґрунтовані рішення щодо керування енергією в мережі. Цей модуль використовує інформацію, зібрану за допомогою комунікаційного модуля, і визначає зміни в керуванні, які необхідно внести в мережу за допомогою співпраці енергетичних роутерів. Об'єднання та обробка розподіленої інформації про стан електричної мережі, зібраної від різних енергетичних роутерів, дозволяє приймати інтелектуальні рішення щодо керування мережею.

Як приклад на рис. 2 приведено структуру архітектури енергетичного роутера [8]. Як видно з рис. 2, архітектура енергетичного роутера може включати наступні складові [8]: головний блок керування, блок керування живленням та декілька блоків інтерфейс з різними джерелами енергії та споживачами. Головний блок керування отримує вхідні дані від декількох джерел енергії та визначає, яким чином маршрутизувати ці дані до споживачів енергії для забезпечення оптимального використання ресурсів. Блок керування живленням забезпечує регулювання вхідної напруги і струму для підтримки стабільної роботи усіх джерел та споживачів енергії. Кожен блок інтерфейсу взаємодіє з конкретним джерелом або споживачем енергії та забезпечує взаємодію між ним та головним блоком керування.

Базова архітектура енергетичного роутера складається з трьох модулів: вхідний модуль, модуль

маршрутизації та вихідний модуль. Вхідний модуль приймає електричний струм від джерел енергії та забезпечує перетворення цього струму в цифрові дані. Модуль маршрутизації забезпечує вибір шляху руху електроенергії з вхідного до вихідного модуля, з урахуванням вимог до мінімізації втрат енергії. Вихідний модуль забезпечує зворотнє перетворення цифрових даних в електричний струм і передачу цього струму до приймачів енергії. Оскільки енергорouter має децентралізовану архітектуру, він може бути використаний для підключення різних типів джерел енергії, включаючи вітрові та сонячні електростанції, акумуляторні батареї та електромобілі.

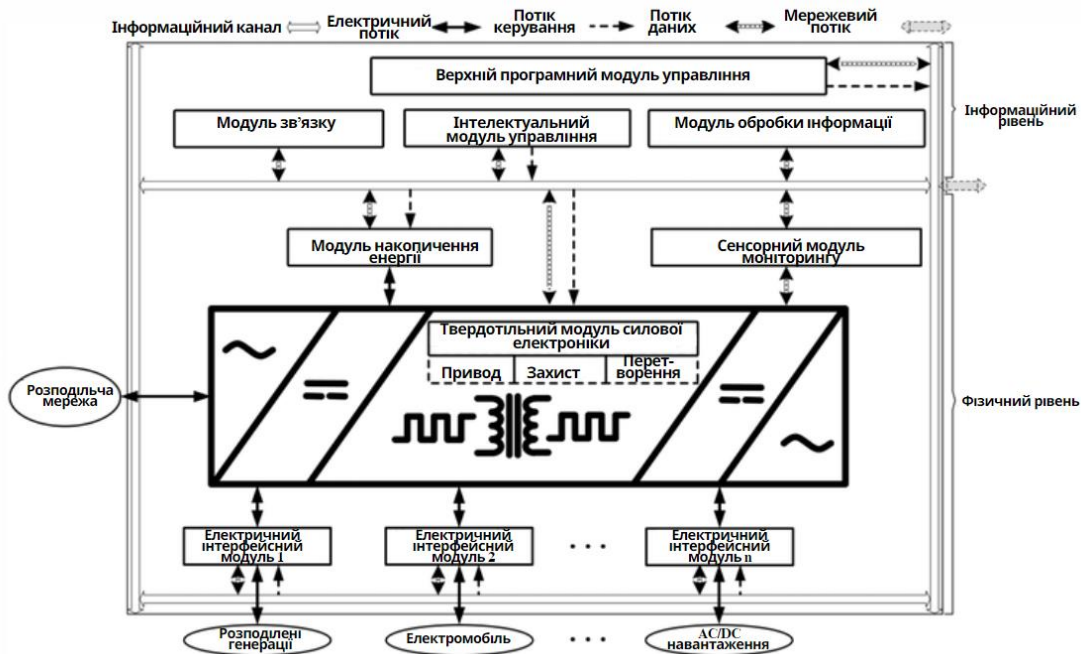


Рисунок 2 – Базова архітектура енергетичного роутера

Дані енергорouterи можуть забезпечувати підключення різні гібридні джерела живлення змінного / постійного струму з різними рівнями напруги, щоб задовольнити потреби споживачів. Для цього використовується схема підключення, яка включає кілька енергетичних роутерів. Енергетичні роутери, що належать одному споживачеві, можуть доповнювати один одного на основі типу порту та потужності, що може спростити структуру та зменшити розмір окремого пристрою енергетичного роутера [8]. Таким чином, основні переваги енергетичних роутерів [8]:

1. Наявність централізованої шини постійного струму дозволяє забезпечити ізоляцію несправностей та збоїв, які виникають на стороні електромережі та на стороні користувача, що забезпечує кожен енергетичний роутер та може постачати електроенергію з високою якістю та надійністю.

2. Розосереджена генерація може бути підключена до централізованої шини постійного струму через свій перетворювач, замість підключення безпосередньо до електромережі через свій власний перетворювач. Це дозволяє уникнути одного етапу перетворення струму з постійного на змінний, спрощує структуру перетворювача розосередженої генерації та зменшує втрати потужності в процесі перетворення.

3. Проблеми, пов'язані з відстеженням та керуванням мережею, а також забезпечення стійкості централізованої шини постійного струму, є актуальними лише для енергетичних роутерів, які підключені до мережі або використовують її для розосередженої генерації електроенергії, тому керування та структури інших енергетичних роутерів можуть бути спрощені.

4. Наявність акумуляторів для зберігання енергії забезпечує можливість постачання електроенергії споживачам системою з'єднання енергетичних роутерів, навіть у разі відмови комунальної електромережі (мережі розподілу). Таким чином, система з'єднання енергетичних роутерів має вищий рівень надійності електропостачання порівняно з традиційною розподільчою мережею.

5. Система взаємозв'язку енергетичних роутерів може регулювати потоки електроенергії, використовуючи акумуляторні батареї для накопичення та передачі надлишкової енергії розосередженої генерації під час великих навантажень. Це може підвищити самодостатність енергорouterів та допомогти досягнути вуглецевої нейтральності в розподільній мережі. Акумуляторні батареї гарантують, що система з'єднання енергетичних роутерів може постачати електроенергію споживачам, навіть якщо комунальна мережа виходить з ладу.

Представимо додаткові переваги системи з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів та

системи з'єднання енергетичних роутерів одного споживача [8]:

1. Локальний енергетичний роутер, який входить до складу багатофазного роутера на базі електроніки з вбудованим накопичувачем, може допомогти кожному споживачу зекономити на перетворювачі змінного / постійного струму, спрощуючи при цьому структуру побутових енергетичних роутерів та зменшуючи втрати електроенергії при перетворенні.

2. Акумуляторні батареї загального користування забезпечують додатковий рівень надійного енергопостачання. Наприклад, якщо енергетичний роутер одного споживача не оснащений акумулятором, то після відключення від електромережі він не зможе забезпечувати нормальну роботу. Але, якщо система об'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів має акумуляторну батарею загального користування з достатнім рівнем заряду, то вона може забезпечити стабільну роботу всіх роутерів в системі, навіть якщо один з них вийшов з ладу через відключення від електромережі. Можна стверджувати, що система об'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів є більш надійною для забезпечення електропостачання, ніж система з одним енергетичним роутером [8].

3. Включення менеджера з торгівлі енергією в систему з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів може уникнути прямого обміну енергією між споживачем та енергосистемою, що дозволяє зменшити залежність споживача від енергосистеми.

4. Зважаючи на відмінності у споживанні електроенергії різними споживачами, ті, які мають потребу купувати електроенергію, та ті, які мають можливість продавати електроенергію, можуть взаємодіяти в системі з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів для взаємовигідного співробітництва. Це підвищить місцевий рівень використання ДРГ та зменшить залежність споживачів від енергії з централізованої мережі.

5. Якщо в системі з'єднання енергетичних роутерів декількох споживачів буде впроваджено відповідний механізм внутрішньої цінової торгівлі, то це може сприяти стимулюванню виробництва та споживання електроенергії кожним споживачем, що дозволить підвищити рівень самодостатності системи з'єднання. Крім того, кожен споживач може купувати електроенергію за нижчою ціною або продавати її за вищою в системі з'єднання, що може збільшити прибуток кожного споживача.

Якщо розглядати систему з ВДЕ, то варто врахувати ризики непостійності потужності, тому енергороутер має забезпечувати оптимізацію генерації. Енергороутер, наприклад, дозволяє підключити сонячні панелі до головної електричної мережі системи розподілу та забезпечити ефективний розподіл електроенергії [22 – 24]. Крім того, енергороутер надає можливість використовувати електроенергію з інших джерел (наприклад, з мережі електропостачання), якщо генерація електроенергії від сонячних панелей була недостатньою. Використання енергороутера також дозволяє регулювати рівень напруги та потужності, що виробляється завдяки сонячним панелям, знизити вартість енергопостачання, оскільки забезпечує оптимальне використання енергії та зменшення залежності від зовнішньої електричної мережі, а також забезпечити додаткові послуги, такі як забезпечення резервної потужності або регулювання напруги та частоти мережі, що може бути використано для отримання додаткових доходів.

У конкретному випадку, наприклад, для ЛЕС на базі сонячних панелей, енергороутер забезпечує передачу енергії між сонячними панелями, акумуляторними батареями та споживачами відповідно до потреб. Це також дозволяє підтримати стабільність роботи ЛЕС. Згідно результатів дослідження [12] було встановлено, що використання енергороутера зі стратегією оптимального керування може знизити вартість енергії на 20–25 % порівняно з традиційним підходом до керування ЛЕС.

2. Оцінка стану ЛЕС з ДРГ

Нарощування / зменшення рівнів генерації чи споживання електроенергії може бути стрибкоподібним або плавним (зміна відповідних функцій монотонно чи стрибкоподібно): за родом струму; за типом генерації – однотипна генерація чи гібридні системи.

Аналіз показав, що для виділеного класу ЛЕС важливо оцінити (проаналізувати) як техніко-економічні (цінові) фактори, так і технологічні фактори (оцінка стійкості, стабільності роботи ЛЕС при зміні режимів роботи генераторів та / чи навантажень), зокрема:

1) аналіз впливу сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, обумовлених функціонуванням генераторів обмеженої потужності та змінних у часі навантажень;

2) співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений (контрольований) перетин для випадків, коли напрямок потоку електроенергії є незмінним чи напрямок потоку електроенергії на конкретних інтервалах часу змінюється;

3) аналіз втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем з оцінкою інтегральної нев'язки, яка визначає вплив сукупності спотворюючих факторів;

4) аналіз впливу зміни напруги ΔU та струму ΔI в перетині ЛЕС обмеженої потужності, коли зміна струму на навантаженні (ΔI) призводить до зміни вихідної напруги (ΔU) від генератора обмеженої потужності та визначається відповідною функціональною залежністю;

5) зміна споживання навантаженням активної потужності за першою гармонікою та за вищими гармоніками як інтегрованими показниками роботи ЛЕС з енергороутерами.

Пункти 1–3 визначають техніко-економічні фактори, а пункти 4 та 5 – технологічні фактори (оцінку стійкості, стабільності роботи) при оцінці ефективності режимів зазначених ЛЕС.

Важливою складовою ефективного функціонування енергорутерів в ЛЕС є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, а також формування відповідних критеріїв енергоефективності та парціального впливу елементів ЛЕС (рівнів електромагнітної сумісності) [13–15].

Загальною характеристикою ефективності передачі енергії, зокрема, втрат електроенергії в ЛЕС можна визначити реактивну потужність Фризе Q_F [20, 21]

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (1)$$

Розглянемо систему, яка складається з однофазного генератора напруги $u(t)$ та підключеного до нього навантаження зі струмом $i(t)$. Втрати при передачі енергії від генератора до навантаження на періоді T складаються з суми необхідних втрат $W_N = R_S I_A^2 T = R_S P^2 T / U$, які обумовлені протіканням струму $i_A(t)$, та додаткових втрат $W_{AD} = R_S I_F^2 T = R_S Q_F^2 T / U$, які обумовлені протіканням струму $i_F(t)$ через вплив діючих факторів (причин) неякісності електроенергії [21].

Величина R_S моделює сумарний активний опір генератора та електричних ліній ЛЕС. Необхідним W_N та додатковим W_{AD} втратам поставимо у відповідність потужності втрат електроенергії – необхідних $P_N = R_S P^2 / U$ та додаткових $P_{AD} = R_S Q_F^2 / U$.

У перетині ЛЕС генератор – навантаження для заданих величин P та U мінімальному значенню діючого струму генератора ЛЕС відповідає миттєвий струм $i_A(t) = Pu(t)/U^2$. Для квадрата діючого значення струму I^2 в контрольованих перетинах справедливим є співвідношення

$$I^2 = \left(\int_0^T i^2(t) dt \right) / T = \left(\int_0^T [i_A(t) + i_R(t)]^2 dt \right) / T = I_A^2 + I_R^2, \quad (2)$$

де I_A та I_R – діючі значення активного $i_A(t)$ та реактивного $i_R(t)$ струмів. Оскільки має місце рівність $I_A = P/U$, то згідно з (2) одержимо

$$Q_F = U [I^2 - I_A^2]^{1/2} = UI_R. \quad (3)$$

Для розгляду особливостей формалізації процедур формування складових балансу електричної енергії наведемо способи розкладу миттєвих функцій $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$ на складові. Для цього здійснимо формальну процедуру розкладу функції $i(t)$ в системі ортогональних функцій $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_\varphi\}$ [21]. Оскільки при використанні функцій $i(t)$, $u(t)$ в перетині ЛЕС електромагнітні процеси розглядаються у двовимірній площині, то виберемо ортогональну систему у вигляді $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_\varphi\}$ при $n_\varphi = 2$; $\varphi_1(t) \equiv u(t)$; $\varphi_2(t) \equiv u_\perp(t)$, де

$$\int_0^T u(t) u_\perp(t) dt = 0. \quad (4)$$

По відношенню до ортогональної системи $\{u(t), u_\perp(t)\}$ струм $i(t)$ розкладемо на дві ортогональні складові $i_{||}(t)$ та $i_\perp(t)$ ($i(t) = i_{||}(t) + i_\perp(t)$), які за визначенням дорівнюють відповідно активній та реактивній складовим струму:

$$i_{||}(t) \equiv i_A(t); \quad i_\perp(t) \equiv i_R(t); \quad i(t) = i_A(t) + i_R(t). \quad (5)$$

Враховавши, що $i_\perp(t) = i(t) - i_A(t)$; $i_A(t) = u(t)/R_{||}$, де $R_{||} = U^2/P$, то згідно з (4) та (5) запишемо

$$u_\perp(t) = R_\perp i_R(t) = R_\perp (i(t) - Pu(t)/U^2). \quad (6)$$

Щодо впливу сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, обумовлених функціонуванням генератора та навантаження. Вираз (6) дозволяє формалізувати розгляд декомпозиції потужності Фризе Q_F на складові. Ці складові надалі дозволять здійснювати деталізацію складових додаткових втрат енергії в ЛЕС.

Причини виникнення додаткових втрат електроенергії в ЛЕС чи конкретному елементі системи можна систематизувати за напрямками [21]:

- спотворення якості електроенергії, що генерується генератором (обмежена та нерівномірною генерація ДРГ) – множина факторів появи додаткових втрат $\{A\}$;
- вплив режимів роботи інших ЛЕС чи обладнання, наприклад, пристроїв силової електроніки (наявність електромагнітних завад, порушення електромагнітної сумісності) – множина факторів $\{B\}$;
- зміни технологічних процесів (зміни режимів чи параметрів технологічних процесів, зокрема, зміни структури та параметри навантажень) – множина факторів $\{C\}$.

До факторів множини $\{B\}$ відносяться енергетичні показники та характеристики електромагнітної сумісності елементів та систем, зміна режимів експлуатації (наприклад, температурних), зміна структури елементів системи чи структури самої системи. Фактори множини $\{C\}$ відображають характеристики різних сторін протікання технологічних (енерготехнологічних) процесів, у тому числі й економічної

доцільності.

Оцінка наведених факторів може також розглядатися як основа для розробки пропозицій щодо зміни функцій навантаження (оптимізації їх роботи), чи зміни конфігурації підсистем ЛЕС, які працюють на постійному чи змінному струмі.

Нехай потужності множин $\{A\}$, $\{B\}$ та $\{C\}$ визначаються величинами $n_{F,A}$, $n_{F,B}$ та $n_{F,C}$. Тоді на появу додаткових втрат електроенергії впливає $n_{F,A} + n_{F,B} + n_{F,C}$ факторів із множини $\{F\} = \{A\} \cap \{B\} \cap \{C\}$ [21]. Покладемо, що для кожного з n_F вибраної множини факторів появи додаткових втрат електроенергії $\{F\}$ можна виділити функцію зміни $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_n^j]$, $j = 1, \dots, n_F$, спектра сигналу $x_e(t)$ (під функцією $x_e(t)$ розуміємо струм $i(t)$ та напругу $u(t)$), n' – кількість ортогональних складових сигналу $x_e(t)$, що враховуються при розгляді втрат; Δx_i^j – зміна i -ї ортогональної складової сигналу $x_e(t)$ від впливу j -го фактора).

Як приклад декомпозиції потужності Q_F на складові наведемо процедуру декомпозиції потужності Q_F на складові для ЛЕС з однофазними стаціонарними навантаженнями. Покладемо, що генератор ЛЕС генератором необмеженої потужності. За характеристиками $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_n^j]$, $j = 1, \dots, n_F$, розділимо діючі значення струму таким чином:

$$I_{R^2} = \sum_{j=1}^{n_F} I_{j,R^2}^2. \quad (7)$$

З урахуванням (7) квадрат потужності Фризе Q_F розіб'ємо на низку адитивних складових

$$Q_{F^2} = \sum_{j=1}^{n_F} U^2 I_{j,R^2}^2 = \sum_{j=1}^{n_F} Q_{F,j}^2, \quad (8)$$

де $Q_{F,j}$ – складова додаткових втрат від впливу j -го, $j = 1, \dots, n_F$, фактора.

Оскільки генератори ЛЕС представляють собою генератори обмеженої потужності, то для його діючого значення напруги U по аналогії із співвідношенням (7), при виділенні j -го фактора запишемо

$$U^2 = \sum_{j=1}^{n_F} U_j^2. \text{ Тоді у загальному випадку для } n_F \text{ вибраних факторів маємо}$$

$$Q_{F^2} = \sum_{j_1, j_2=1}^{n_F} U_{j_1}^2 I_{j_2,R^2}^2 = \sum_{j_1, j_2=1}^{n_F} Q_{F,j_1, j_2}^2, \quad (9)$$

де Q_{F,j_1, j_2} – складова додаткових втрат, яка визначається впливом j_1 -го фактору неякісності електроенергії на напругу $u(t)$ та j_2 -го фактору неякісності електроенергії на струм $i(t)$.

Поняття «характеристика неоптимальності» може використовуватися, коли одну з функцій ми будемо вважати як оптимальну (в даному випадку це функція споживання активної потужності). Використання Q_F для оцінки нерівномірності процесів покажемо на прикладі режиму, який характеризується діючими значеннями напруги U_i та струму I_i , $i = 1, \dots, n$, T_i – тривалість i -го інтервалу, при умові $\cos \varphi = 1$ для інтервалу $T_T > T_{NET}$, де T_{NET} – період мережі. У випадку $\delta_i = T_i / T_T$, $\sum \delta_i = 1$ можна записати вираз для потужності Фризе Q_F [25]:

$$Q_{\Phi} = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \delta_i - (\sum_{i=1}^n U_i I_i \delta_i)^2}. \quad (10)$$

Співвідношення (10) дозволяє здійснювати у подальшому відповідні економічні розрахунки, зокрема, отримати відповідні техніко-економічні показники роботи ЛЕС.

Власне розраховані додаткові втрати електроенергії можна представити матрицею впливу, в якій елементом (j_1, j_2) буде складова втрат Q_{F,j_1, j_2}^2 . Можемо знехтувати впливом окремих елементів (Q_{j_1, j_2}) при умові $(Q_{j_1, j_2}) < \delta_{Q_F}$.

Важливого значення набуває співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів сталості структури ЛЕС. Співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений перетин згідно наведених співвідношень (1), (9), (10) для потужності Фризе доцільно здійснювати для двох випадків:

- 1) напрямок потоку електроенергії є незмінним;
- 2) напрямок потоку електроенергії змінюється.

Для опису особливостей такої оцінки розглянемо перетин А–А між двома елементами E_1 та E_2 системи. Покладемо, що на інтервалі часу T_{T1} має місце потік енергії від E_1 до E_2 із значеннями напруги $u_1(t)$ та струму $i_1(t)$, а на інтервалі часу T_{T2} має місце потік енергії від E_2 до E_1 із значеннями напруги $u_2(t)$ та струму $i_2(t)$. тоді можемо розрахувати два значення реактивної потужності Фризе Q_{F12} та Q_{F21} , які

визначаються функціями $u_1(t)$, $i_1(t)$ та $u_2(t)$, $i_2(t)$.

Для співставлення втрат в контрольованому перетині А–А можемо застосувати показники: $\Delta_{E1G} = Q^2_{F12} / (Q^2_{F12} + Q^2_{F21})$; $\Delta_{E2G} = Q^2_{F21} / (Q^2_{F12} + Q^2_{F21})$, де виконується умова $\Delta_{E1G} + \Delta_{E2G} = 1$. Також може бути доцільним застосувати показник $\Delta_{12} = \Delta_{E1G} / \Delta_{E2G}$ чи $\Delta_{21} = \Delta_{E2G} / \Delta_{E1G}$.

Наведений підхід може бути поширений на довільне число визначених контрольованих перетинів та ЕНС, коли напрямки потоків енергії через виділені перетини є незмінними. При цьому зазначеннями величин Δ_{E1G} , Δ_{E2G} , Δ_{12} чи Δ_{21} можемо дати узагальнені характеристики зміни інтенсивності втрат електроенергії при зміні напрямків потоків енергії через виділені перетини ЛЕС.

3. Аналіз втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем

В залежності від гармонічного складу можливі варіанти напруги та струму в перетинах ЛЕС представлено нижче:

- 1) $u(t) = U_0$; $i(t) = I_0$;
- 2) $u(t) = u_1(t)$; $i(t) = i_1(t)$;
- 3) $u(t) = U_0$; $i(t) = I_0 + i_\infty(t)$;
- 4) $u(t) = U_0 + u_\infty(t)$; $i(t) = I_0$;
- 5) $u(t) = U_0 + u_\infty(t)$; $i(t) = I_0 + i_\infty(t)$;
- 6) $u(t) = u_1(t)$; $i(t) = i_1(t) + i_\infty(t)$;
- 7) $u(t) = u_1(t) + u_\infty(t)$; $i(t) = i_1(t)$;
- 8) $u(t) = u_1(t) + u_\infty(t)$; $i(t) = i_1(t) + i_\infty(t)$.

Для формування спрощених оцінок у подальшому розглянемо узагальнені варіанти 5 та 8 при використанні постійних складових та перших гармонік напруги і струму (5-й варіант) та перших і третіх гармонік напруги та струму (8-й варіант):

$$5\text{-й варіант: } u(t) = U_0 + u_1(t); i(t) = I_0 + i_1(t);$$

$$8\text{-й варіант: } u(t) = u_1(t) + u_3(t); i(t) = i_1(t) + i_3(t).$$

Для виділених узагальнених варіантів покажемо, що потужність Фризе Q_F дозволяє сформуванати однотипні показники ефективності енергетичних процесів як для систем змінного, так і постійного струму. Для системи постійного струму запишемо

$$\begin{aligned} Q_{F^2} &= S^2 - P^2 = (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - (P_0 + P_1)^2 = \\ &= (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - (U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

де U_0 та I_0 – середні (діючі) значення постійної напруги та струму; U_1 та I_1 – діючі значення першої гармоніки напруги та струму у перетині ЛЕС.

Введемо модифіковану потужність $Q_{F(0)}$ згідно наступного співвідношення:

$$Q_{F(0)}^2 = S^2 - P_0^2 = (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - P_0^2 = (U_0^2 + U_1^2) \cdot (I_0^2 + I_1^2) - (U_0 \cdot I_0)^2. \quad (12)$$

Для системи змінного струму запишемо

$$\begin{aligned} Q_{F^2} &= S^2 - P^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (P_1 + P_3)^2 = \\ &= (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos\varphi_3)^2, \end{aligned} \quad (13)$$

де U_1 та I_1 – діючі значення першої гармоніки напруги та струму; U_3 та I_3 – діючі значення третьої гармоніки напруги та струму; φ_1 (φ_3) – кут зсуву фаз між напругою та струмом першої (третьої) гармоніки у перетині ЛЕС.

Введемо модифіковану потужність $Q_{F(1)}$ згідно наступного співвідношення:

$$Q_{F(1)}^2 = S^2 - P_1^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - P_1^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1)^2. \quad (14)$$

При $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_3 = 1$ вирази (13) та (14) набудуть вигляду:

$$Q_{F^2} = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3)^2; \quad (15)$$

$$Q_{F(1)}^2 = (U_1^2 + U_3^2) \cdot (I_1^2 + I_3^2) - (U_1 \cdot I_1)^2. \quad (16)$$

Відповідно можемо ввести коефіцієнти корисної дії $\mu_{(0)}$ та $\mu_{(1)}$:

$$\mu_{(0)} = P_0 / (P_0 + P_1); \quad (17)$$

$$\mu_{(1)} = P_1 / (P_1 + P_2). \quad (18)$$

Також можемо визначити квадратичні різниці

$$Q_{\Delta F(0)}^2 = Q_{F(0)}^2 - Q_F^2 = (U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1)^2 - (U_0 \cdot I_0)^2 = 2U_0 \cdot I_0 \cdot U_1 \cdot I_1 + (U_1 \cdot I_1)^2; \quad (19)$$

$$Q_{\Delta F(1)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos\varphi_3)^2 - (U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1)^2. \quad (20)$$

Співвідношення (20) при $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_3 = 1$ можемо записати

$$Q_{\Delta F(1)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = (U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3)^2 - (U_1 \cdot I_1)^2 = 2U_1 \cdot I_1 \cdot U_3 \cdot I_3 + (U_3 \cdot I_3)^2. \quad (21)$$

Вирази (19) та (21) після алгебраїчних перетворень та використанні наближених співвідношень $(U_1 \cdot I_3)^2 \approx 0$ та $(U_3 \cdot I_3)^2 \approx 0$ набудуть вигляду

$$Q_{\Delta F(0)}^2 = Q_{F(0)}^2 - Q_F^2 = (U_0 \cdot I_0 + U_1 \cdot I_1)^2 - (U_0 \cdot I_0)^2 = 2U_0 \cdot I_0 \cdot U_1 \cdot I_1 = 2P_0 \cdot P_1; \quad (22)$$

$$Q_{\Delta F(1)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = (U_1 \cdot I_1 + U_3 \cdot I_3)^2 - (U_1 \cdot I_1)^2 = 2U_1 \cdot I_1 \cdot U_3 \cdot I_3 = 2P_1 \cdot P_3. \quad (23)$$

При умові $U_3 = 0$ та $\cos\varphi_1 \neq 0$ вираз для визначення Q_F запишемо наступним чином

$$\begin{aligned} Q_F^2 &= S^2 - P^2 = U_1^2 \cdot (I_1^2 + I_3^2) - P_1^2 = U_1^2 \cdot I_1^2 \cdot \sin\varphi_1^2 + U_1^2 \cdot I_3^2 = \\ &= U_1^2 \cdot I_1^2 (\sin\varphi_1^2 + k_{\Pi}^2), \end{aligned} \quad (24)$$

де $k_{\Pi} = I_3 / I_1$. При $S^2 \approx U_1^2 \cdot I_1^2$ має місце співвідношення $Q_F^2 / S^2 = \sin\varphi_1^2 + k_{\Pi}^2$.

4. Вплив зміни напруги, струму та рівнів споживання активної потужності в перетині ЛЕС

При оцінці впливу зміни напруги ΔU та струму ΔI в перетині ЛЕС обмеженої потужності потрібно враховувати, що зміна струму на навантаженні (ΔI) призводить до зміни вихідної напруги (ΔU) від генератора обмеженої потужності (визначається відповідною функціональною залежністю). Для ЛЕС при оцінці рівнів неоптимальності їх роботи в більшості випадків потрібно враховувати внутрішній опір генератора $R_{ВН}$ і опір лінії $R_{Л}$. Покладемо $R_S = R_{INT} + R_L$.

У загальному випадку для величин ΔU та ΔI має місце функціональна залежність $\Delta U = f(\Delta I)$, яку при врахуванні величин R_{INT} та R_L , можемо записати як $\Delta U = \Delta I \cdot (R_{INT} + R_L) = \Delta I \cdot R_S$. Розглянемо перетин ЛЕС при початкових значеннях напруги U_1 та струму I_1 . У разі зміни струму на величину ΔI ($I_2 = I_1 + \Delta I$), величина напруги U_2 у виділеному перетині буде рівною $U_2 = U_1 - \Delta I \cdot (R_{INT} + R_L) = U_1 - \Delta I \cdot R_S$.

Величина реактивної потужності Фризе Q_F для даного випадку при розгляді двох інтервалів, ($\delta_1 + \delta_2 = 1$) буде визначатися із співвідношення:

$$\begin{aligned} Q_F^2 &= (U_1^2 \delta_1 + U_2^2 \delta_2) (I_1^2 \delta_1 + I_2^2 \delta_2) - (U_1 I_1 \delta_1 + U_2 I_2 \delta_2)^2 = \\ &= (U_1^2 (1 - \delta_2) + (U_1 - \Delta I \cdot R_S)^2 \delta_2) (I_1^2 (1 - \delta_2) + (I_1 + \Delta I)^2 \delta_2) - \\ &- (U_1 I_1 (1 - \delta_2) + (U_1 - \Delta I \cdot R_S) (I_1 + \Delta I) \delta_2)^2. \end{aligned} \quad (25)$$

Після алгебраїчних перетворень співвідношення (25) може бути перетворено до вигляду:

$$Q_F^2 = \Delta I^2 \delta_2 \delta_1 \cdot (U_1 + R_S \cdot I_1)^2 - 2\Delta I^2 \delta_2 R_S U_1 \cdot (I_1 - \Delta I) - \Delta I^4 \delta_2 \cdot R_S. \quad (26)$$

Якщо третім доданком правій частині співвідношення (26) можна знехтувати, то значення Q_F^2 визначається наближеною рівністю

$$Q_F^2 = \Delta I^2 \delta_2 \delta_1 \cdot (U_1 + R_S \cdot I_1)^2 - 2\Delta I^2 \delta_2 R_S U_1 \cdot (I_1 - \Delta I). \quad (27)$$

Точність застосування наближеного співвідношення (27) можна оцінити показником:

$$\beta_{Q_F} = (\Delta I^4 \delta_2 \cdot R_S) / [\Delta I^2 \delta_2 \delta_1 \cdot (U_1 + R_S \cdot I_1)^2 - 2\Delta I^2 \delta_2 R_S U_1 \cdot (I_1 - \Delta I) - \Delta I^4 \delta_2 \cdot R_S].$$

Співвідношення (25) та (26) показують складну залежність рівня неоптимальності споживання енергії в ЛЕС від зміни величин ΔI , δ_2 , U_1 , R_S та I_1 . Для ілюстрації оцінки впливу зазначених величин на величину Q_F^2 на рис. 3 представлено залежності $Q_F^2(\delta_2)$ від параметрів I_1 , R_S та ΔI при $U_1 = 200$ В; $I_1 = 0,2$ А; $R_S = 0,2$ Ом та при $\Delta I = 0,2$ А (крива С1); $\Delta I = 0,5$ А (крива С2) та $\Delta I = 1,0$ А (крива С3).

Для оцінки зміни споживання навантаженням активної потужності $\Delta P_{(1)}$ за першою гармонікою та $\Delta P_{(\infty)}$ за вищими гармоніками як інтегрованими показниками розглянемо уточнення рівнів неоптимальності споживання активної потужності в ЛЕС на вищих гармоніках (наявність однойменних гармонік напруги і струму) з використанням потужності Фризе Q_F . Покладемо, що активна потужність P є сумою двох складових $P = P_1 + \Delta P$, де відповідно P_1 і ΔP – споживання активної потужності по першій і вищих гармоніках. У цьому випадку можемо записати:

$$Q_F^2 = S^2 - P^2 = S^2 - (P_1 + \Delta P)^2. \quad (28)$$

Якщо врахувати, що $S^2 = U^2 I^2 = U_1^2 (1 + \delta_u^2) I_1^2 (1 + \delta_i^2)$, $S_1^2 = U_1^2 I_1^2$ то співвідношення (28) можемо представити у вигляді:

$$Q_F^2 = S^2 - P^2 = U_1^2 I_1^2 (1 + \delta_u^2) (1 + \delta_i^2) - (P_1 + \Delta P)^2, \quad (29)$$

де δ_u та δ_i – коефіцієнти вищих гармонік по напрузі і струму.

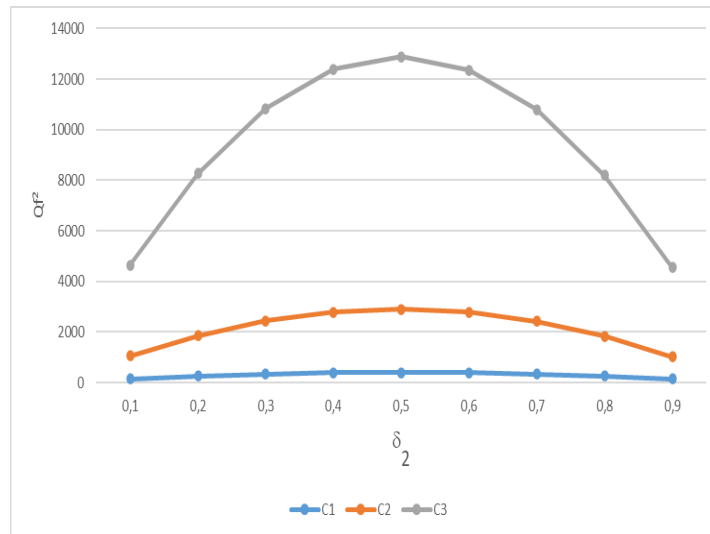


Рисунок 3 – Графіки залежностей $Q_F^2(\delta_2)$ від параметрів I_1 , R_s та ΔI

З врахуванням співвідношення $Q_1^2 = S_1^2 - P_1^2$ та умов $\delta_u^2 \ll \delta_i^2$ і $\Delta P^2 \ll P_1^2$, співвідношення (26) може бути перетворено до вигляду:

$$Q_F^2 = Q_1^2 + U_1^2 I_1^2 (\delta_u^2 + \delta_i^2) - (P_1^2 + 2P_1 \Delta P)^2.$$

Для оцінки неоптимальності процесів в ЛЕС з урахуванням негативного впливу активної потужності на вищих гармоніках доцільно застосовувати модифікацію потужності Фризе в запису $Q_{F(1)}^2 = S^2 - P_1^2$, яка для формули (29) представляється у формі

$$Q_{F(1)}^2 = S^2 - P_1^2 = U_1^2 I_1^2 (1 + \delta_u^2) (1 + \delta_i^2) - P_1^2. \quad (30)$$

Співставлення співвідношень (29) та (30) дозволяє визначити «внесок» наявності споживання активної потужності ΔP в системі:

$$Q_{F(\Delta P)}^2 = Q_{F(1)}^2 - Q_F^2 = 2P_1 \Delta P + \Delta P^2. \quad (31)$$

Для оцінки впливу ΔP на рівень неоптимальності передачі потужності P_1 з використанням (31) можна використати співвідношення:

$$Q_{F(\Delta P)}^2 / P_1^2 = 2(\Delta P / P_1) + (\Delta P / P_1)^2. \quad (32)$$

У випадку $2P_1 \Delta P \gg \Delta P^2$, має місце наближене співвідношення $Q_{F(\Delta P)}^2 \approx 2P_1 \Delta P$, яке відображає лінійну залежність величини $Q_{F(\Delta P)}^2$ від величин складової потужності P_1 та ΔP . У таблиці наведена оцінка впливу ΔP на рівень неоптимальності передачі потужності $P_1 = 2$ кВт. Зазначимо, що при апроксимації $\Delta P = \alpha_P P_1$ співвідношення (32) набуде вигляду $Q_{F(\Delta P)}^2 / P_1^2 = 2\alpha_P + (\alpha_P)^2$.

Таблиця – Оцінка впливу ΔP на рівень неоптимальності передачі потужності P_1

Величина	ΔP , кВт							
	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$Q_{F(\Delta P)}^2$, (кВАр) ²	0,41	0,84	1,063	1,29	1,523	1,76	2,003	2,25
$Q_{F(\Delta P)}^2 / P_1^2$	0,103	0,21	0,266	0,323	0,381	0,44	0,501	0,563

Висновки

1. Використання енергетичних роутерів є перспективним напрямком розвитку сучасних енергетичних систем. Їх важливість передбачає забезпечення ефективного керування енергетичними потоками, точного обліку електроенергії та розуміння динаміки процесів. Впровадження цих технологій може сприяти побудові стійких, ефективних та сталих енергетичних систем, які відповідають вимогам сучасного світу. Енергетичні роутери забезпечують ефективну маршрутизацію енергії в мережі,

контролюють напругу і потужність в системі та забезпечують сумісність між різними енергосистемами. При підключенні до інтелектуальної мережі енергетичні роутери регулюють потоки електроенергії з ЛЕС в інтелектуальну мережу і навпаки, беручи до уваги попит і пропозицію електроенергії в межах ЛЕС.

2. Важливою складовою ефективного функціонування енергороутерів та платформеного підходу в ЛЕС, відповідно до вимог Енергетичного Інтернету, є аналіз складових втрат електроенергії, вплив на їх рівні різних факторів, а також формування відповідних критеріїв енергоефективності та парціального впливу елементів ЛЕС (показників оцінки рівнів електромагнітної сумісності).

3. Використання потужності Фризе Q_F дозволило з єдиних позицій врахувати процеси енергозабезпечення навантажень ЛЕС на змінному та постійному струмі, надає можливість ретроспективного, поточного та перспективного аналізу – однотипно для постійного та змінного струмів; загальна оцінка по однотипні (спільній) методології. Декомпозиція миттєвої функції сигналу використовується для аналізу часткового впливу складових сигналів (напруги та/або струму) через різні додаткові джерела втрат потужності на ділянці ЛЕС. З використанням декомпозиції миттєвих функцій сигналів виконано аналіз парціального впливу складових сигналів (напруги та / чи струму), обумовленими різними факторами появи додаткових втрат електроенергії, в перетині ЛЕС.

4. Оцінено як техніко-економічні (цінові) фактори, так і технологічні фактори (оцінка стійкості, стабільності роботи ЛЕС при зміні режимів роботи генераторів та / чи навантажень), зокрема: вплив сукупності різних факторів появи додаткових втрат електроенергії, обумовлених функціонуванням генератора та навантаження; співставлення втрат електроенергії для різних інтервалів часу через виділений перетин: напрямок потоку електроенергії є незмінним чи напрямком потоку електроенергії змінюється; аналіз втрат електроенергії в системах постійного та змінного струму ЛЕС чи гібридних систем (введення модифікованих потужностей $Q_{F(0)}$ та $Q_{F(1)}$, як інтегральної оцінки нев'язки, яка визначає вплив спотворюючих факторів); вплив зміни напруги ΔU та струму ΔI в перетині ЛЕС обмеженої потужності; зміна споживання навантаженням активної потужності $\Delta P_{(1)}$ за першою гармонікою та $\Delta P_{(\infty)}$ за вищими гармоніками як інтегрованими показниками.

Список використаної літератури

1. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. IRENA. 2019. 52 p.
2. Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Volume 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
3. Денисюк С.П. Енергетичний перехід–вимоги якісних змін у розвитку енергетики. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. № 1. С. 7–28.
4. The Energy Internet. An Open Energy Platform to Transform Legacy Power Systems into Open Innovation and Global Economic Engines. Edited by Wencong Su, Alex Q. Huang, Elsevier Ltd, 2019. 380 p.
5. Kloppenburg, S., Boekelo, M. Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition. *Energy Research & Social Science*. 2019. Vol. 49. P. 68–73.
6. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Використання динамічної тарифікації для оптимізації техніко-економічних показників ЛЕС на локальних ринках електроенергії. *Техн. електродинаміка*. 2022. № 3. С. 37–48. doi:10.15407/techned2022.03.037
7. <https://social-innovation.hitachi/en-eu/about/white-papers/digital-energy/the-future-of-energy/>
8. Bin Liu, Bingzhao Zhu, Ziyong Guan, Chengxiong Mao, Dan Wang. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. – <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/enc2.12062>. doi.org/10.1049/enc2.12062
9. Xianyang Cui, Yulong Liu, Ding Yuan, Tao Jin, Mohamed A. Mohamed. A Hierarchical Coordinated Control Strategy for Power Quality Improvement in Energy Router Integrated Active Distribution Networks. *Sustainability*. 2023, 15(3), 2655. doi.org/10.3390/su15032655
10. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Oct. 2011. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340
11. Chen, R., Yang, Y., Jin, T. Protection and Control of Modern Power Systems. *Article number 15: A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit*, 2022.
12. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. *Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet*. Oct. 2011.
13. Wang, K., Yu, J., Yu, Y., Qian, Y. A survey on energy internet: architecture, approach, and emerging technologies. *IEEE Systems Journal*. 2018. Vol. 12. № 3. P. 2403–2416.
14. Zeng, P., Li, H., He, H., Li, S. Dynamic energy management of a ЛЕС using approximate dynamic programming and deep recurrent neural network learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, iss. 4. P. 4435–4445.
15. Zhu, J. Optimization of Power System Operation. N-Y.: John Wiley & Sons, 2015. – 638 p.

16. Denysiuk, S., Zaichenko, S., Opryshko, V., Derevianko, D. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2021(2). P. 19–31. doi:10.21303/2461-4262.2021.001689
19. Жаркин А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации. *Київ: Наукова думка*, 2017. 230 с.
20. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 62–64.
21. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. *Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами*. Київ: Текст, 2010. 264 с.
22. Lei, B., Xu, L., Wang, Z., Wang, Y., Huang, Q. *Journal of Physics: Conference Series, Design of Multi-port Direct Current Energy Router*. Conf. Ser. 2030 012027, 2021.
23. Liu, B., Zhu, B., Guan, Z., Mao, C., Wang, D. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. *Energy Convers. Econ.* 3. 2022. P. 181–200.
24. Xie, Z., Manimaran, G., Vittal, V., Phadke, A. G., Centeno, V. An Information Architecture for Future Power Systems and Its Reliability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*/ 2002/ vol. 17, No. 3. P. 857–863.
25. Денисюк С.П., Опришко В.П. Оцінка нерівномірності споживання та генерації електричної енергії в локальних електроенергетичних системах. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2017. №48. С. 43–51.

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

K. Hilevich¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-9074-0683

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

OPTIMIZATION OF THE USE OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES IN LOCAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMUM LOSS OF ELECTRICITY

Abstract. *The issue of optimizing the use of distributed energy resources in local electric power systems (LES) based on the criterion of minimum power loss is considered. It was determined that an important step in optimizing the use of distributed energy resources in the LES is the development of an energy router that allows devices that generate, store, and consume electricity to be combined into a single system at low voltage (without integration into medium voltage electrical networks). The energy router itself can be positioned as a basic device that ensures the operation of LES, the interaction of neighboring LES at the level of energy and information exchange, and the integration of specific LES to medium voltage distribution networks.*

It is shown that the basic component of the evaluation of the effective functioning of energy routers and the platform approach in the LES, in accordance with the requirements of the Energy Internet, is the analysis of the components of electricity losses, the influence on their level of various factors, as well as the formation of appropriate energy efficiency criteria and the assessment of the partial impact of LES elements. It is proposed to carry out a description of energy processes during the decomposition of Frize reactive power with the allocation of reactive and active current in the controlled intersections of the system. The decomposition of the QF power into components under the action of various causes (factors) of additional electricity losses in the LES, in particular, due to different modes of operation of generators and LES loads (voltage and current spectra), both during the period of system operation and for an arbitrary period of time, was considered. which is determined by technological factors of system operation.

The use of Frize power made it possible to take into account the energy supply processes of LES loads on alternating and direct current from a single point of view, in particular, to assess the impact of a combination of various factors of the appearance of additional electricity losses; comparison of electricity losses for different time intervals through a selected controlled intersection, when the direction of the flow of electricity is constant or the direction of the flow of electricity changes during separate time intervals; analysis of electricity losses in direct and alternating current systems of LES or hybrid systems, where modified capacities are introduced, as integral estimates of the discrepancy, which determines the influence of distorting factors; assessment of the impact of changes in voltage and current in the intersection of LES of limited power on the components of additional losses; analysis of changes in load consumption of active power according to the first harmonic and higher harmonics as integral indicators.

Keywords: *local electric power systems, distributed energy resources, Energy Internet, energy router, energy processes, Friese power, factors of distortion of energy consumption, components of electricity losses, optimization procedures.*

References

1. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. IRENA. 2019. 52 p.
2. Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo. How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Volume 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
3. Denysiuk, S. Energy transition – requirements for qualitative changes in energy development. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2019. No. 1. P. 7–28.
4. The Energy Internet. An Open Energy Platform to Transform Legacy Power Systems into Open Innovation and Global Economic Engines. Edited by Wencong Su, Alex Q. Huang, Elsevier Ltd, 2019. 380 p.
5. Kloppenburg, S., Boekelo, M. Digital platforms and the future of energy provisioning: Promises and perils for the next phase of the energy transition. *Energy Research & Social Science*. 2019. Vol. 49. P. 68–73.
6. Kyrlyenko, O., Zhuykov, V., Denysiuk, S. The use of dynamic pricing to optimize technical and economic indicators of LES on local electricity markets. *Technical electrodynamic*s. 2022. No. 3. P. 37–48. doi:10.15407/techned2022.03.037
7. <https://social-innovation.hitachi/en-eu/about/white-papers/digital-energy/the-future-of-energy/>
8. Bin Liu, Bingzhao Zhu, Ziyou Guan, Chengxiong Mao, Dan Wang. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. – <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/enc2.12062>. doi.org/10.1049/enc2.12062
9. Xianyang Cui, Yulong Liu, Ding Yuan, Tao Jin, Mohamed A. Mohamed. A Hierarchical Coordinated Control Strategy for Power Quality Improvement in Energy Router Integrated Active Distribution Networks. *Sustainability*. 2023, 15(3), 2655. doi.org/10.3390/su15032655
10. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet. *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Oct. 2011. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340
11. Chen, R., Yang, Y., Jin, T. Protection and Control of Modern Power Systems. *Article number 15: A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit*, 2022.
12. Zhang, J., Xu, Y., Wang, W., Juneja, A., Bhattacharya, S. *Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet*. Oct. 2011.
13. Wang, K., Yu, J., Yu, Y., Qian, Y. A survey on energy internet: architecture, approach, and emerging technologies. *IEEE Systems Journal*. 2018. Vol. 12. № 3. P. 2403–2416.
14. Zeng, P., Li, H., He, H., Li, S. Dynamic energy management of a JIEC using approximate dynamic programming and deep recurrent neural network learning. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10, iss. 4. P. 4435–4445.
15. Zhu, J. Optimization of Power System Operation. N-Y.: John Wiley & Sons, 2015. – 638 p.
16. Denysiuk, S., Zaichenko, S., Opryshko, V., Derevianko, D. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. *EUREKA, Physics and Engineering*. 2021(2). P. 19–31. doi:10.21303/2461-4262.2021.001689
17. Zharkin, A., Denysiuk, S., Popov, V. Power supply systems with distributed generation sources. *Kyiv: Naukova Dumka*. 2017. 230 p.
18. Denysiuk, S. Analysis and optimisation of energy processes in distributed electric power systems. *Technical electrodynamic*s. 2016. № 4. P. 62–64.
19. Zhuykov, V., Denysiuk, S. Energy processes in electrical circuits with key elements. *Kyiv: Text*, 2010. 264 p.
20. Lei, B., Xu, L., Wang, Z., Wang, Y., Huang, Q. *Journal of Physics: Conference Series, Design of Multi-port Direct Current Energy Router*. Conf. Ser. 2030 012027, 2021.
21. Liu, B., Zhu, B., Guan, Z., Mao, C., Wang, D. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality. *Energy Convers. Econ.* 3. 2022. P. 181–200.
22. Xie, Z., Manimaran, G., Vittal, V., Phadke, A. G., Centeno, V. An Information Architecture for Future Power Systems and Its Reliability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems/ 2002/ vol. 17, No. 3*. P. 857–863.
23. Denysiuk, S., Opryshko, V. Estimation of non-uniformity of consumption and generation of electric energy in local electric power systems. *Proceedings Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2017. No. 48. P. 43–51.

Надійшла: 02.11.2023

Received: 02.11.2023

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ MICROGRID СИСТЕМ З НАКОПИЧУВАЧАМИ

У даній статті проведено аналіз потенціалу використання ВДЕ на потреби теплопостачання громадських і житлових будівель в Україні та світі. Визначено, що Україна має один з найбільших у Європі потенціал по використанню ВДЕ. Проведено аналіз «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» та зроблено висновок, що спостерігається тенденція до децентралізації енергопостачання та збільшення частки використання технологій ВДЕ для генерації теплової енергії. Проаналізовано загальне постачання первинної енергії за типами джерел та обсягами генерування. На основі співставного аналізу фактичних та прогнозованих даних по генеруванню енергії ВДЕ зроблено висновок, що є тренд на поступове зменшення генерації теплової енергії котельнями на вугіллі, газі та нафтопродуктах, та збільшення генерації за допомогою котлів на біомасі, сонячних колекторів та теплових насосів. На основі аналізу стратегії Net Zero зроблено висновок що Україна та світ поступово будуть зменшувати використання традиційної генерації та впроваджувати сучасні технології не тільки на потреби електропостачання, а й на потреби теплопостачання.

Ключові слова: Теплопостачання будівель, відновлювальні джерела енергії, тепла енергія, сонячна енергія, біопаливо, біогаз.

Вступ. За останні кілька років в Україні сформувалася значна кількість інвесторів, зацікавлених інвестувати у розвиток нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВДЕ). Згідно даних Української асоціації відновлювальної енергетики, на кінець 2019 року у галузь відновлювальних джерел енергії біло інвестовано 10 млрд. доларів [1]. З яких 6,2 млрд. доларів було залучено у період 2018-2019 років.

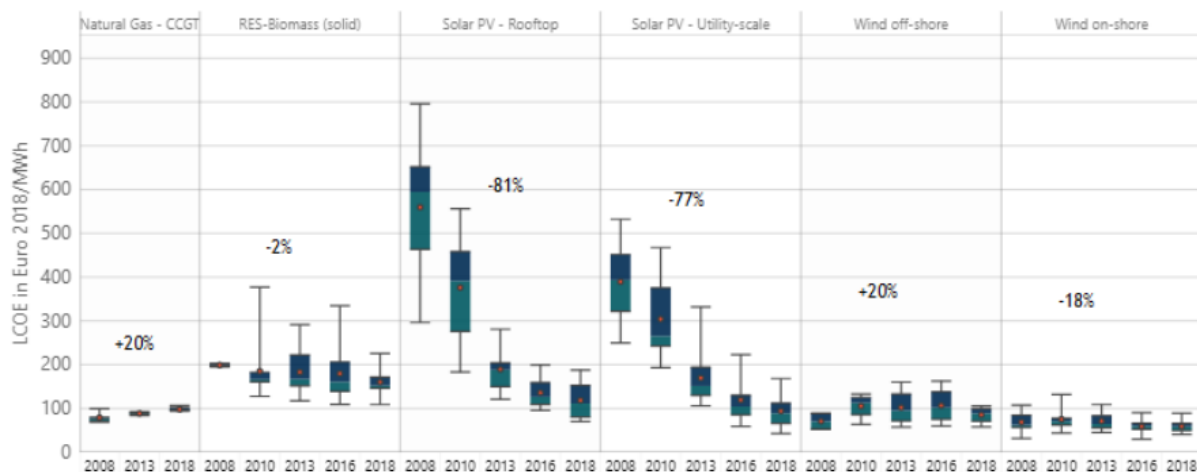
Головною причиною такого росту, став «зелений» тариф та зменшення капіталовкладень на будівництво об'єкту, за рахунок значного розвитку технологій НВДЕ, що в свою чергу вплинуло на зниження вартості сонячних фотоелектричних панелей та систем (див. рис.1) [2,8].

Однак, розглянувши співвідношення вартості будівництва сонячних фотоелектричних станцій до вартості «зеленого» тарифу за 2013-2021 рік наведені у табл. 1 та на рис. 2, можна зробити висновок, що найбільш окупними інвестиціями у сонячні електростанції, для їх експлуатації в умовах «зеленого» тарифу, були інвестиції у 2013 році (оскільки ставка зеленого тарифу була найвища). Разом з тим, найбільше залучення інвестицій у галузь відбулося у 2018-2019 роках.

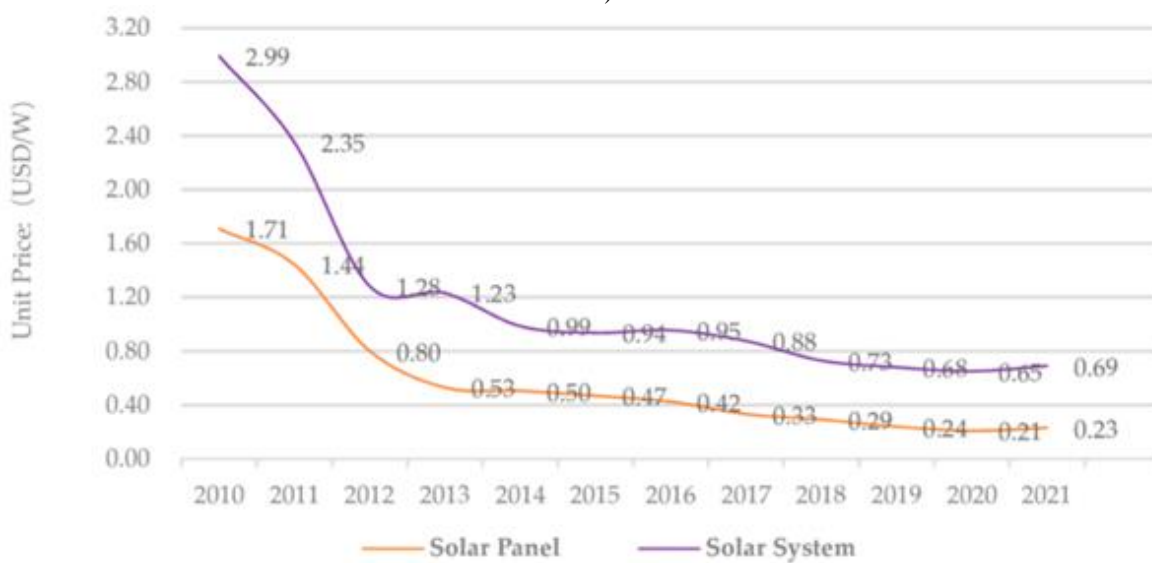
Таблиця 1 – Ціновий тренд вартості сонячних панелей та «зеленого» тарифу

Рік	2013	2014	2015	2015	2016	2017-2019	2020	2021
Зелений тариф, євро за кВт*год [3]	0.47	0.34	0.31	0.17	0.16	0.15	0.11	0.11
Крос курс, долар-євро	1.36	1.36	1.10	1.10	1.14	1.22	1.09	1.17
Зелений тариф, доларів за кВт*год	0.63	0.46	0.34	0.19	0.18	0.18	0.12	0.13
Вартість сонячних панелей, дол. за 1 кВт	650	520	480	480	440	300	240	210
Відношення вартості сонячних панелей до вартості "зеленого" тарифу	1 027.19	1 126.98	1 429.08	2 572.34	2 413.14	1 636.62	1 956.27	1 649.96

Це пояснюється тим, що станом на 2018-й рік галузь НВДЕ була уже достатньо розвинена. Сформувалась велика та конкурентна кількість фахівців та компаній що займаються поставкою обладнання, проектуванням, будівництвом та експлуатацією об'єктів НВДЕ, між ними виникла конкуренція у залученні інвесторів, банки сформували вигідні умови кредитування нових об'єктів та рефінансування існуючих об'єктів. За рахунок цього значно знизився поріг входження у галузь відновлювальних джерел енергії та енергетики загалом для інвесторів з інших галузей.



a)



б)

Рисунок 1 – ціновий тренд: а) зниження LCOE на ВДЕ з 20008 по 2018 рр.; б) вартості фотоелектричних панелей та фотоелектричних систем на одиницю встановленої потужності

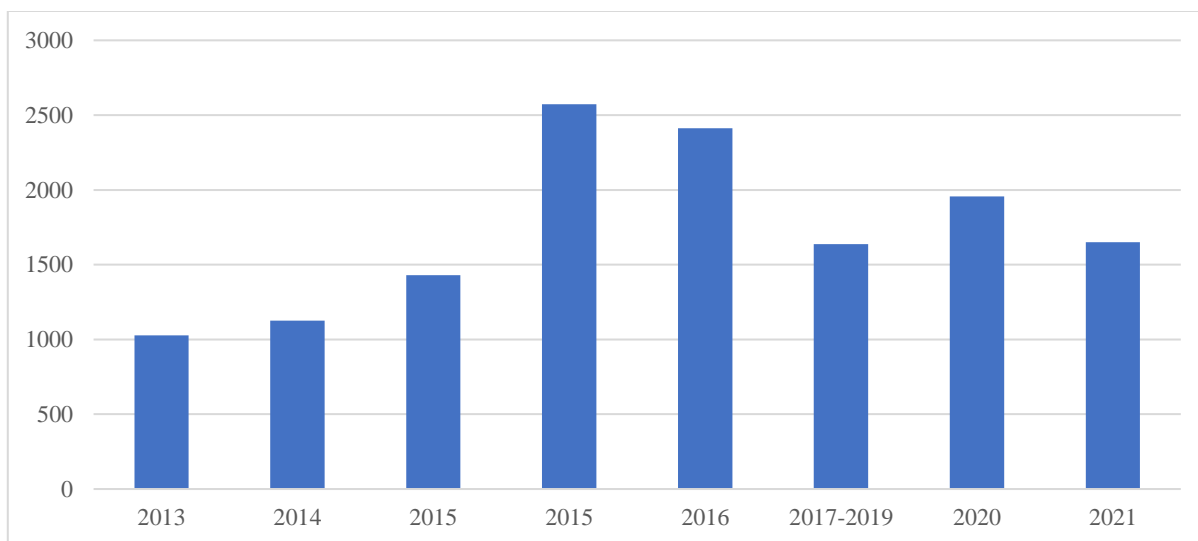


Рисунок 2 - Відношення вартості фотоелектричних панелей до величини "зеленого" тарифу

Подібний розвиток галузі і був метою введення стимулюючого «зеленого» тарифу. Станом на сьогодні, в умовах зростання вартості енергії всіх видів та тарифів на розподіл в електричних мережах, інвестори будують об'єкти ВДЕ для роботи не в умовах пільгового «зеленого» тарифу, а для покриття власних потреб. Вони без проблем можуть знайти, на конкурентному ринку, підрядника для реалізації EPC-контракту (від англ. Engineering, procurement and construction) на будь-який об'єкт, а терміни введення в експлуатацію об'єкта ВДЕ потужністю у десятки мегават може становити кілька місяців (наприклад, для сонячних електростанцій (СЕС)).

Однак, такого стрімкого росту сегменту ВДЕ не відбулося б, без доведеної та ефективної фінансової доцільності, продемонстрованої для перших інвесторів ВДЕ в Україні. Разом з тим, зростання частки ВДЕ у загальному енергетичному балансі України створює необхідність забезпечення керованості означених систем [6, 7], в основному шляхом побудови та використання сучасних систем накопичення електричної енергії [7]. Можна зробити висновок, що подібний шлях проходитиме і розвиток сегменту накопичувачів електричної енергії, а отже на даному етапі розвитку цього сегменту ринку, для інвесторів необхідно продемонструвати найбільш ефективну модель залучення коштів у даний сегмент.

Вплив структури ОЕС України на передумови для реалізації стратегії цінового арбітражу в умовах ринку електричної енергії України

Волатильність спотового ринку електричної енергії обумовлена його структурою. Режим роботи ОЕС України визначається на основі балансу виробництва та споживання електроенергії, ремонту електричних мереж та енергогенеруючого обладнання, а також можливості ліквідації надзвичайних ситуацій у випадку зупинки електроенергетичного обладнання на електростанціях та пошкодження магістральних ЛЕП. У вітчизняній енергосистемі працюють 413 виробників електричної енергії, з яких сім – потужних енергогенеруючих компаній забезпечують близько 90% всього виробництва, 40 підприємств з передачі електроенергії місцевими (локальними) електричними мережами та 147 компаній з постачання електричної енергії [4] (див. рис. 3).

Станом на 1 листопада 2019р., основні генеруючі потужності у складі ОЕС України зосереджені на:

- 4 атомних електростанцій (АЕС), на яких діє 15 енергоблоків, з яких 13 – потужністю по 1 000 МВт і 2 – потужністю 415 та 420 МВт;
- каскадах з 8 ГЕС на річках Дніпро й Дністер із загальною кількістю гідроагрегатів – 103 одиниці, а також трьох гідроакмулюючих станціях (ГАЕС), з яких 11 гідроагрегатів з потужністю від 33 МВт до 324 МВт;
- 12 ТЕС із блоками одиначною потужністю 150, 200, 300 і 800 МВт, з яких 75 енергоблоків, у т.ч. потужністю: 150 МВт – 6, 200 МВт – 31, 300 МВт – 32, 800 МВт – 6 та 3 турбогенератора, а також 3 великих ТЕЦ з енергоблоками 100 (120) МВт та 250 (300) МВт;
- 147 сонячних електростанцій (СЕС), 27 біогазових електростанцій (БіоЕС), 19 вітрових електростанцій (ВЕС), загальний відсоток вироблення електричної енергії яких становить 3,7% сумарного вироблення по ОЕС України, проте їх частка постійно збільшується.

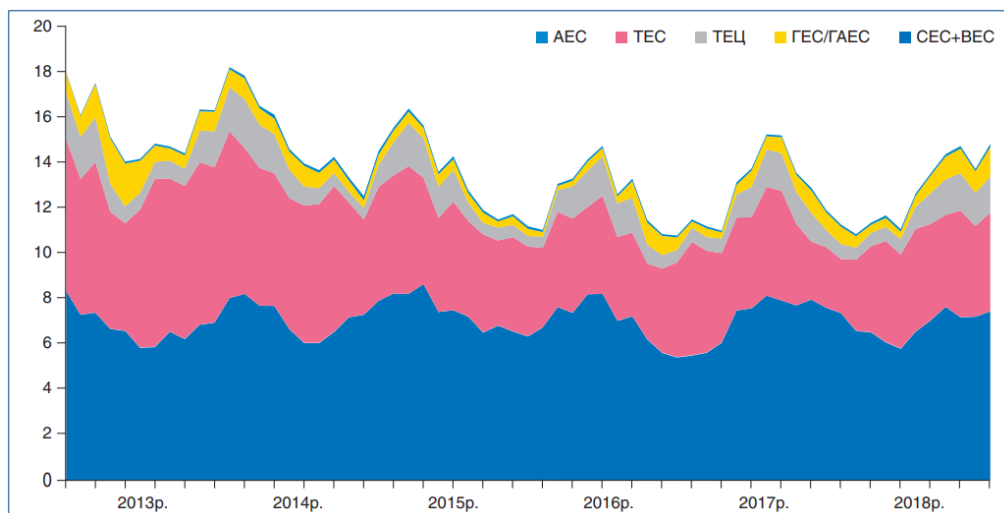


Рисунок 3 – Річна структура генерації України

Для забезпечення стабільної роботи ОЕС України базові електростанції повинні складати 50-55%, напівпікові – 30-35%, пікові (найбільш керовані) – 15%.

Насьогодні у національній енергосистемі спостерігається брак пікових потужностей (10% проти необхідних 15%). Унаслідок цього до регулювання досить активно залучають енергоблоки ТЕС [5].

Хоч дані наведені станом на листопад 2019, структура генерувальних потужностей не зазнала радикальних змін і можливості її перебудови в середньостроковій перспективі не передбачається.

З іншого боку, навантаження також характеризується значною нерівномірністю, співвідношення нічного навантаження та навантаження у період вечірніх піків знаходиться в межах 0.7. Разом з вищеприписаною структурою генерації, це ускладнює завдання управління енергосистемою для підтримання стабільної частоти. Також нерівномірність споживання спостерігається територіально, та в залежності від сезонності року. Це обумовлено тим, що є значна частка споживання електроенергії для побутових потреб населення, яка сильно коливається в залежності від температури навколишнього середовища. Так у 2012-му році частка споживання промисловістю становила майже 47%, а у 2017р. – 42,8%, а побутових споживачів 26,7% у 2012р. до 29,4% у 2017р.

Варто коректно аналізувати дані промислового споживання, адже протягом 2014-2015рр. кілька разів відбувався обвал виробництва. І лише у 2016р. спостерігалася стабілізація економіки. Упродовж 2016-2018рр. форма профілів споживання електроенергії в зимовий і літній періоди суттєво не змінилася (див. рис.4).

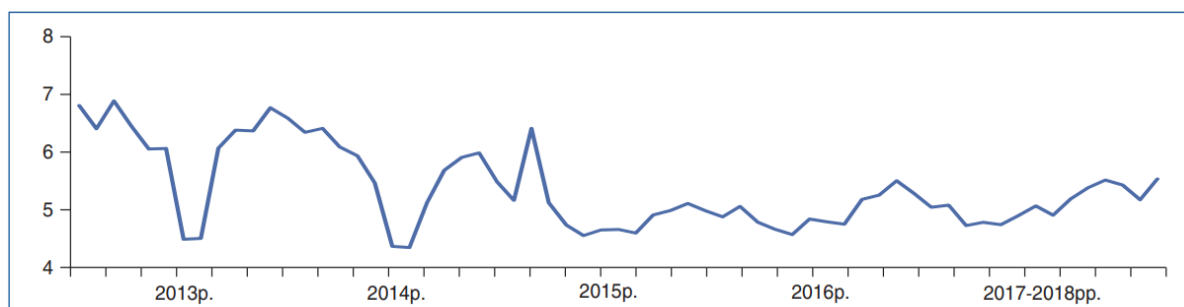


Рисунок 4 - Споживання електроенергії промисловістю в Україні

Причиною цього стало скорочення промисловості у зв'язку з війною росії проти України котра розпочалася у 2014-му році, та окупацією промислово розвинених районів Донецької та Луганської областей.

Попит на електроенергію з боку побутових споживачів має чітко виражений сезонний характер, що пояснюється впливом двох факторів:

-зі збільшенням температури, збільшується використання систем кондиціонування, що мало б збільшувати споживання електроенергії;

-світловий день набагато довший, ніж узимку, а тому витрачається набагато менше електроенергії на освітлення. Для України очевидно цей фактор переважаючий. Узимку споживання досягає піку, що пов'язано зі зменшенням світлового дня та необхідністю ввімкнення обігрівуючих приладів задля економії, зокрема газу.

Наслідки нового вторгнення російської федерації нам ще доведеться оцінювати у майбутньому, однак описана вище структура енергетики, скоріш за все, збережеться.

Особливості роботи спотового ринку електричної енергії України

Ринок електричної енергії в Україні почав працювати з 1 липня 2019 року. Однак, на етапі його впровадження існували різні обмеження нижнього та верхнього рівня цін (прайс-кепи). Також, після нового вторгнення у лютому 2022 року, НКРЕКП встановила нижні прайс-кепи для стабілізації ситуації на ринку електричної енергії, які діють понині.

Таким чином, для оцінки стратегій цінового арбітражу, найбільш доцільно обрати період з найліберальнішим періодом роботи ринку електричної енергії, а саме з серпня 2021 по грудень 2022 року. Вибір цього періоду достатній, так як враховує річну сезонність (рис. 5).

Протягом усього періоду спостерігається тенденція низької ціни в 2-6 період, та високої у 18-22 період. Та дуже широкий діапазон цін в 8-16 періодах. Відповідно, існують умови для цінового арбітражу. Стратегію якого можливо реалізовувати на інших сегментах ринку, однак РДН (Ринок доба наперед) являється індикативним для комерційних споживачів, тому ефективність стратегій доцільно оцінювати на його основі.

Стратегія цінового арбітражу в умовах лібералізованого ринку електричної енергії на основі розрахунку мінімальної рентабельної різниці цін

В умовах ринкової економіки, масове впровадження нової технології залежить від фінансової доцільності їх впровадження для конкретного інвестора, однак це несе у собі додатковий синергетичний ефект, який відображається у зміні структури ОЕС України, підвищенні об'ємів та якості маневрених потужностей, росту стійкості та надійності системи в цілому.

Широке впровадження подібних технологій є свого роду «game changer» («зміною правил гри») для усієї галузі. Дана технологія має широкий діапазон можливостей використання на усіх рівнях. Але виходячи із функціоналу систем накопичення та існуючого ринку електричної енергії зі значною волатильністю, актуальним завданням також є розгляд цінового арбітражу.

У подібних випадках, для швидкого розвитку нового сегменту галузі застосовують стимулюючі тарифи, покращені умови імпорту технологій та інші фінансові та бюрократичні механізми. Головним завданням є пошук ефективної стратегії для впровадження в існуючих умовах.

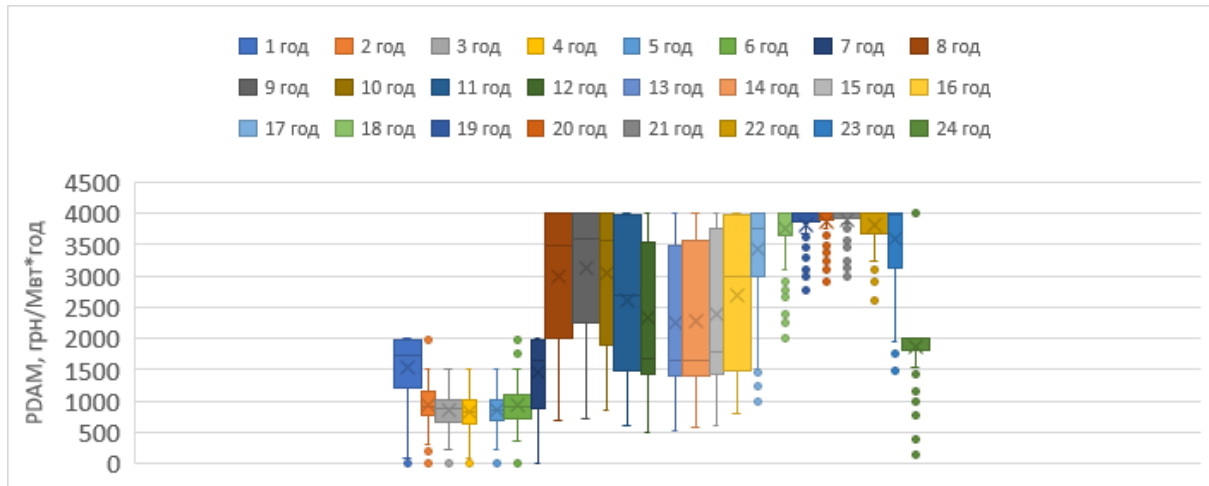


Рисунок 5 - Діапазон цін РДН по періодах доби за серпень-грудень 2021 року

Для цього було зроблено ряд допущень та спрощень, а саме:

- Вартість та технічні параметри накопичувачів взяті із комерційних пропозицій, європейських та українських постачальників обладнання, актуальних на квітень 2021 року.
- Так як означені системи поставляються комплектно, капіталовкладення на будівельні, монтажні та пусконаладжувальні роботи неспіврозмірно малі із вартістю самих системи, та були прийняті у розмірі 5% від них.
- Дані Ринку на добу наперед взяті за серпень-грудень 2021, у зв'язку з тим, що до цього періоду та після нього працювали суворі обмеження верхньої та нижньої ціни, які спочатку були пов'язанні із поступовим введенням ринку електричної енергії, а потім із форс-мажорними обставинами.
- Не враховуються дисконтування грошових потоків за термін окупності, умова залучення кредитних коштів та інші можливі фінансові інструменти.
- Прийнято, що накопичувач працюватиме у MicroGrid системі достатнього обсягу, для споживання усієї накопленої електричної енергії – це дозволить не включати у розрахунок плату за розподіл електричної енергії.

Інтеграція системи накопичувача розглядається як частина розбудови MicroGrid системи з генеруючою одиницею та навантаженням. Однак, в даному випадку, розрахунок проведено для накопичувача, як незалежної системи з метою оцінки його комерційної доцільності, а його обсяг оптимізується в залежності від наявних ринкових умов. З комерційної точки зору рівнозначно, що накопичена електроенергія буде віддаватись навантаженню всередині MicroGrid системи чи в зовнішню мережу, тому даний розрахунок може підійти для будь якої MicroGrid системи. Однак, в реалізації такої системи, підключення до зовнішніх мереж викликатиме ряд додаткових затрат на приєднання.

Враховуючи обмежений ресурс циклів роботи системи накопичення на основі Lithium-ion battery, доцільно виходити на ринок, коли різниця протягом доби перевищує вартість капіталовкладень на один цикл, з урахуванням втрат на перетворення енергії та амортизацію основних фондів.

Мінімальну різницю цін, при якій для доцільно здійснювати стратегію цінового арбітражу на основі систем накопичення у MicroGrid системах визначено за формулою:

$$P_{Amin} = \frac{CAPEX}{n_{warranty} \cdot E_{BA} \cdot (1 - DoD_A) \cdot (1 - k_d)} \cdot \eta_{BESS}$$

де $CAPEX$ – капіталовкладення необхідні для системи накопичення; $n_{warranty}$ – гарантована виробником кількість циклів зарядки/розрядки; E_{BA} – встановлений обсяг накопичувача; k_d – коефіцієнт деградації накопичувача; η_{BESS} – ефективність накопичувача.

З урахуванням зазначених спрощень та допущень було розраховано відповідну мінімальну рентабельну різницю цін:

$$P_{Amin} = \frac{29\,795\,566.5}{5000 \cdot 3024 \cdot (1 - 0.2) \cdot (1 - 0.125)} \cdot 0.96 = 2702.54 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$$

Використавши її, для моделювання торгової стратегії на основі даних РДН за період серпень-грудень 2021 року, визначено прибуток, який може отримати MicroGrid система з накопичувачами застосовуючи стратегію цінового арбітражу (результати моделювання наведено у таблиці 2).

Таблиця 2 - моделювання торгової стратегії цінового арбітражу для роботи систем накопичення електричної енергії в умовах лібералізованого ринку електричної енергії

Індикатор	Без урахування мінімальної доцільної різниці цін	З урахуванням мінімальної доцільної різниці цін
Кількість циклів заряду/розряду за період серпень-грудень 2021	153	130
Загальна вартість усіх циклів зарядження, грн	-759 754	-589 517
Загальна вартість усіх циклів розрядження, грн	2 882 002	2 526 578
Потенційний прибуток, грн	2 122 248	1 937 061
Прибуток із одного циклу	13 871	14 900
Ефективність стратегії	грн	1 030
	%	7%
Орієнтовний термін окупності	5.89	6.45
	різниця, років	- 0.56
	різниця, %	-10%

Висновки.

Згідно проведеного аналізу можна зробити висновок, що зростання частки ВДЕ у загальному енергетичному балансі України створює необхідність забезпечення їх керованості, в основному шляхом побудови та використання сучасних систем накопичення електричної енергії. Такі системи найбільш доцільно використовувати у складі локальних електроенергетичних систем Microgrid.

Запропоновано модель торгової стратегії цінового арбітражу для роботи систем накопичення електричної енергії в умовах лібералізованого ринку електричної енергії. Результати моделювання показують що за ґрунтуючись на вихідних даних за умови роботи ринку електроенергії у такому режимі є вкрай рентабельним. А з огляду на те, що такі системи значно підвищують керованість ВДЕ їх впровадження у енергетичну систему України на основі архітектури Microgrid є вкрай доцільним на сьогодні.

Список використаної літератури

1. <https://uare.com.ua/novyny/711-u-vidnovlyuvanu->
2. Price trend of solar panels and solar systems. https://www.researchgate.net/figure/Price-trend-of-solar-panels-and-solar-systems-Source-69_fig3_351857177
3. ЗАКОН УКРАЇНИ Про альтернативні джерела енергії <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>
4. <https://www.mev.gov.ua/storinka/istoriya-enerhetyky>

5. ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ виклики та ініціативи. Центр Разумкова, 2020, Видавництво «Заповіт», 2020
6. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2021. No 4. С 44-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
7. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V., "Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
8. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf

D. Derevinko^{1,2}, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

V. Vorobel¹, student, ORCID 0009-0008-3693-8494

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

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

PERFORMANCE EFFICIENCY INCREASE OF THE MICROGRIDS WITH ENERGY STORAGE SYSTEMS

In this paper, an analysis of the potential of using RES for the heat supply needs of public and residential buildings in Ukraine and the world is carried out. It was determined that Ukraine has one of the largest potentials in Europe for the use of RES. An analysis of the "Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness" was carried out and it was concluded that there is a trend towards decentralization of energy supply and an increase in the use of RES technologies for thermal energy generation. The total primary energy supply was analyzed by types of sources and volumes of generation. On the basis of a comparative analysis of actual and projected data on RES energy generation, it was concluded that there is a trend towards a gradual decrease in thermal energy generation by coal, gas, and oil-fired boilers, and an increase in generation using biomass boilers, solar collectors, and heat pumps. Based on the analysis of the Net Zero strategy, it was concluded that Ukraine and the world will gradually reduce the use of traditional generation and introduce modern technologies not only for the needs of electricity supply, but also for the needs of heat supply.

Keywords: Heat supply of buildings, renewable energy sources, thermal energy, solar energy, biofuel, biogas.

References

1. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/>
2. Price trend of solar panels and solar systems. https://www.researchgate.net/figure/Price-trend-of-solar-panels-and-solar-systems-Source-69_fig3_351857177
3. ZAKON UKRAINY Pro alternatyvni dzherela enerhii <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>
4. <https://www.mev.gov.ua/storinka/istoriya-enerhetyky>
5. ЕНЕРГЕТИКА УКРАЇНИ виклики та ініціативи. Тсентр Разумкова, 2020, Вydavnytstvo «Zapovit», 2020
6. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Trach I.V. Otsinka efektyvnosti vykorystannia system nakopychennia elektroenerhii v elektrychnykh meshzhakh. Tekhnichna elektrodynamika. 2021. No 4. S 44-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
7. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkarupylo V., "Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System," 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2021. Pp. 262-265. DOI: <https://10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
8. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf

Надійшла: 06.10.2023

Received: 06.10.2023

ТРАНЗАКТИВНІ ЛОКАЛЬНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ: ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Через глобальні занепокоєння щодо зміни клімату, розгортання розподілених енергетичних ресурсів і впровадження систем зберігання електричної та теплової енергії було прискорено, щоб мінімізувати викиди CO₂. Крім того, було наголошено на необхідності оптимального енергетичного менеджменту цих енергетичних ресурсів, щоб зменшити потребу в нових енергетичних ресурсах. Поняття транзактивної енергії та, відповідно, транзактивних систем було введено для сучасних енергосистем як системи економічних і керуючих механізмів, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію у всій електричній інфраструктурі з використанням вартості як ключового показника. Це забезпечує економічно ефективну інтеграцію ВДЕ та створює стимули для інвестицій та інноваційного оновлення місцевих енергетичних систем, що дозволяє управляти як пропозицією, так і попитом на електроенергію. В статті розглянуто архітектуру транзактивних систем, її складові. Основною цільовою функцією транзактивних систем є мінімізація загальних річних витрат на локальну систему, що підтримує безперервність енергопостачання. Для оцінки поточної собівартості електроенергії необхідно мати інформацію щодо розподілу інвестицій, вкладених в проект перед початком його реалізації, між періодами реалізації проекту. Розглянуті критерії оптимізації, використання яких залежить від конкретних цілей. Важливо використовувати багатокритеріальну оптимізацію та методи керування для визначення структури системи та оптимального розподілу енергії, отриманої з різних джерел, щоб максимізувати ефективність усієї системи, одночасно сприяючи максимальному скороченню викидів у навколишнє середовище, і при цьому мінімізуючи витрати на виробництво енергії.

Ключові слова: транзактивна енергія, Microgrid, локальні енергетичні ринки, відновлювані джерела, розосереджені джерела

Вступ. Щодня кількість нових виробників електроенергії з відновлюваних джерел енергії, що підключаються до світової електромережі, продовжує зростати. Кількість активів, необхідних для підтримки балансу між попитом і пропозицією в цій колективній мережі, також зростає. Вони все більше покладаються на інтелектуальну та інтерактивну мережеву систему, засновану на економічних та ринкових принципах, де транзакції використовуються для регулювання мережі та підтримки надійності та ефективності [1].

Для управління енергією в Microgrid можуть бути реалізовані різні підходи, які можна класифікувати як пасивне, активне та транзактивне управління енергією. Деталі різних механізмів керування енергією показано на рисунку 1 [2].

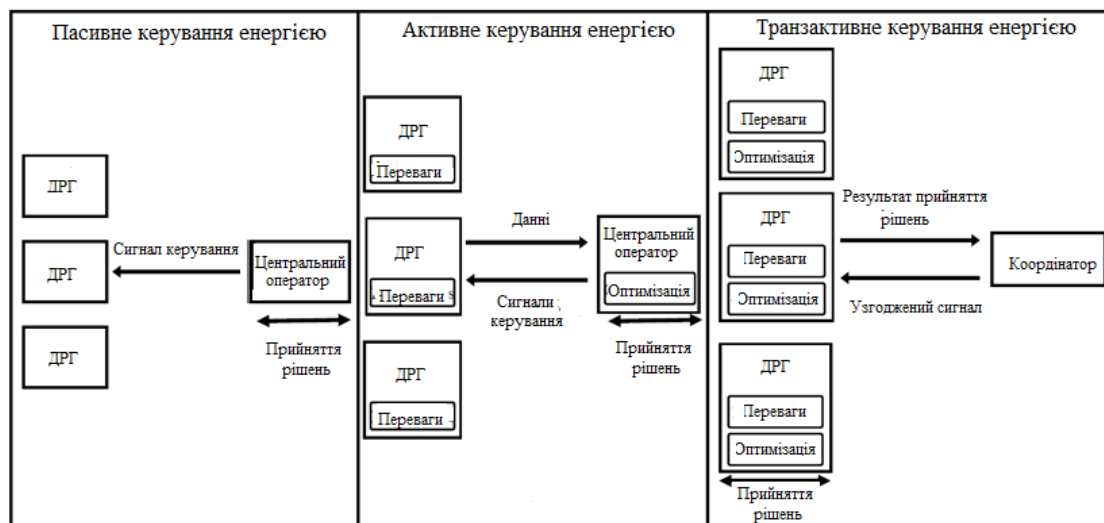


Рисунок 1- Механізми керування енергією

У пасивному управлінні енергією центральний оператор керує всіма пасивними джерелами розосередженої генерації (ДРГ). Програма прямого контролю навантаження є прикладом пасивного управління енергією, де навантаження споживачів і гнучкість контролюються безпосередньо центральним оператором. Пасивне управління енергією не враховує переваги ДРГ, і всі рішення приймаються централізовано. Отже, комунікація в пасивному управлінні є однонаправленою від центрального оператора до пасивних споживачів.

В активному управлінні енергією система оптимізації перевіряє всі навантаження, щоб визначити найкраще рішення для системи, беручи до уваги дані ДРГ, щоб включити їхні переваги в централізовану оптимізацію. Отже, для обміну інформацією необхідний двонаправлений зв'язок, що викликає занепокоєння щодо конфіденційності приватних даних ДРГ кінцевого використання [3].

Як у пасивному, так і в активному підходах до управління енергією, центральний оператор приймає рішення для всієї системи. Третій підхід до енергоменеджменту — транзактивне енергетичне управління, яке дозволяє як попиту, так і пропозиції активно вести переговори щодо обміну енергією.

Microgrid виникли з ідеєю самозабезпечення своїх об'єктів; однак цей сценарій швидко змінився з усвідомленням того, що транзакційні методи можуть бути використані стратегічно для отримання економічних переваг [2]. У цьому контексті програми реагування на попит та транзактивної енергетики стали широко обговорюватися в дослідженнях, спрямованих на збалансування споживання та виробництва в енергосистемі [3]. ТЕ включає в себе характеристики, які дозволяють системі розподілу функціонувати з урахуванням гнучкості як споживачів, так і виробників у балансі між попитом та пропозицією. Енергетичний сектор розвивається завдяки залученню розподілених енергетичних ресурсів [6] та прогресу в галузі інформаційних технологій [7].

Застосування такої концепції, як транзактивна енергія (ТЕ) в поєднанні з Microgrid, створило нові парадигми для вивчення в цьому секторі. З цієї причини теоретичні дослідження на цю тему є дуже актуальними, особливо щодо інтересу енергетичного ринку до систем, які інтегрують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та пропонують рішення екологічних проблем; отже, МГ стали ще більш привабливою альтернативою [8].

Взаємодія між системами з кількома носіями енергії дає можливість досягти доступної та чистої енергії, використовуючи енергетичні ресурси більш ефективним способом. У [11] запропоновано оптимальне керування енергією кількох енергетичних вузлів, кожен з яких є енергетичною системою з кількома рівнями управління енергією на добу наперед, щоб спланувати профілі попиту на електроенергію та управляти своїми внутрішніми енергетичними ресурсами для зменшення загальних витрат енергії та рівень викидів CO₂.

За наявності системи ТЕ мережа може полегшити комунікацію між усіма точками попиту і пропозиції; таким чином, це забезпечить створення середовища взаємодії, в якому кожна точка може обмінюватися енергетичною інформацією і, по суті, обговорювати вартість енергії в будь-який час [4].

Мета та задачі.

Мета – проаналізувати основні аспекти енергосистеми на основі використання концепції транзактивної енергії.

Матеріал і результати досліджень

У майбутній енергосистемі механізми координації повинні забезпечити активну участь великої кількості пристроїв, що споживають або виробляють енергію, які зараз лише пасивно підключені до енергетичної інфраструктури, у виконанні завдань координації як на локальному, так і на загальносистемному рівні. Транзактивна енергетика була запропонована як спосіб вирішення цієї проблеми, який є масштабованим, ефективним і передбачуваним у своїй роботі, забезпечуючи при цьому конфіденційність і право вибору для споживача. Через проблеми, що виникають в електроенергетичній інфраструктурі, дослідження і розробки, пов'язані з ТЕ, переважно спрямовані на координацію в електроенергетичній системі. Таким чином, основна література також орієнтована на електроенергетику.

У [5] дається наступна характеристика системи ТЕ: "в системі управління транзактивною енергією на рівні розподілу середні та малі пристрої, що споживають або виробляють енергію, автоматично домовляються про свої дії один з одним, з пристроями у фізичній мережі та з диспетчерськими системами постачальників енергії через сучасні та масштабовані алгоритми електронного ринку". У США Рада з архітектури GridWise Architecture прийняла наступне визначення транзактивної енергії: "сукупність економічних механізмів та механізмів управління, які дозволяють динамічно балансувати попит та пропозицію по всій електричній інфраструктурі, використовуючи вартість як ключовий операційний параметр" [6].

Ключовими елементами цього визначення є:

-Вартість як ключовий операційний параметр: Це означає, що "операційні рішення приймаються шляхом обміну вартісною інформацією, зафіксованою в транзакціях між учасниками" [5].

-Поєднання управління системою та використання економічних механізмів: транзакції між учасниками ведуть до управління пристроями, які споживають, виробляють або зберігають електроенергію.

-Використання від рівня передачі з його великими обсягами виробництва і транспортування електроенергії до системи розподілу і різноманітних підключених споживачів [5]. Зауважимо, що там, де існують добре функціонуючі ринки оптової торгівлі електроенергією та послуг системи передачі, рівень передачі електроенергії вже функціонує як транзитивна енергетична система. Завдання полягає в тому, щоб запровадити ТЕ і на рівні розподілу електроенергії в електроенергетичній системі. Мережі розподілу електроенергії демонструють вищий рівень складності з набагато більшою кількістю мережевих вузлів та підключених споживачів.

-Динамічний баланс попиту та пропозиції.

Модель транзактивної енергетичної системи (ТЕС) має чотири основні підсистеми: фізична система, інформаційна система, система транзакцій і система регулювання (рис.2). Фізична система включає виробництво, зберігання, передачу та розподіл енергії разом із розумними пристроями кінцевого користувача. Інформаційна система побудована для збору, обробки, організації та передачі інформації як в енергосистемі, так і на енергетичних ринках. Система транзакцій керує різними видами енергетичних транзакцій для створення ефективного енергетичного ринку. Система регулювання захищає від економічних зловживань і порушення правил. Це також забезпечує безпеку та надійність ринку. ТЕС пропонує метод забезпечення надійності та безпеки енергосистеми з одночасним підвищенням ефективності шляхом координації зростаючої кількості ВДЕ.

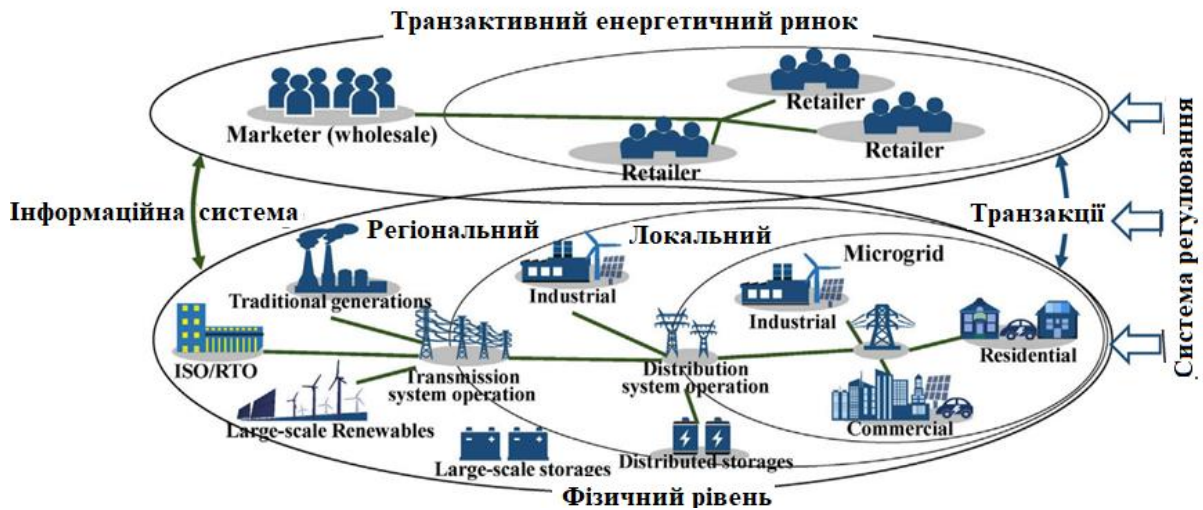


Рисунок 2 - Схематичне зображення транзактивної енергосистеми

Архітектура транзактивної енергетичної системи

Архітектура транзактивної енергетичної системи має децентралізовану форму, основною ідеєю якої є досягнення операційних та економічних цілей за допомогою скоординованої інтеграції виробників, споживачів. Ключовою особливістю ТЕС є зменшення проблеми переривчастості ВДЕ за рахунок залучення більш активних споживачів та прос'юмерів до енергетичних транзакцій [9]. Різні дослідники пропонують архітектури ТЕС з різних точок зору, як показано на рис. 4.

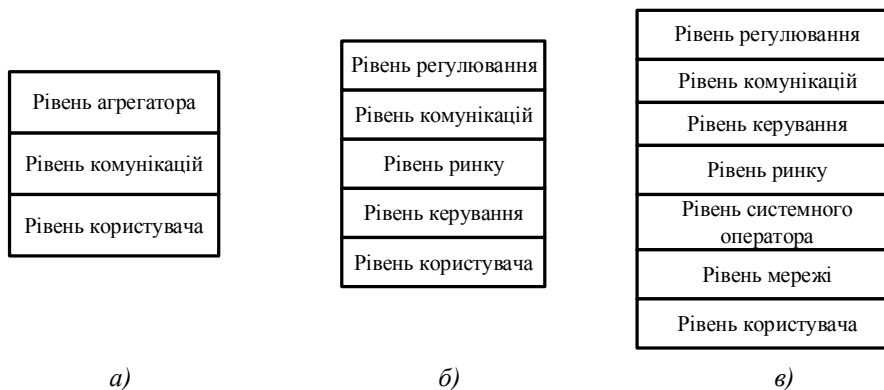


Рис. 4 Архітектура ТЕС: 3-рівнева (а) [11], 5-рівнева [12] (б), 7-рівнева [13] (в).

Трирівнева архітектура була запропонована в [10], та має у складі агрегатор, комунікаційний рівень та рівень користувача. Енергетичні транзакції виконуються на рівні користувача, де користувачі можуть задавати свої вподобання та цілі. Комунікаційний рівень займається зв'язком учасників та серверів, які, в свою чергу, залежать від наявності такої інфраструктури. Рівень агрегатора включає центр обробки даних, який аналізує дані для віртуального обміну енергією. Однак він не включає визначення ціни на енергію або регулювання рівнів електромереж і має спрощений підхід.

У [11] було запропоновано п'ятирівневу ТЕС, яка містить комунікаційний рівень, ринковий рівень, рівень регулювання, рівень енергоменеджменту та рівень користувача. На рівні користувача технологія розподіленого реєстру та комунікаційні пристрої використовуються учасниками для надсилання своїх заявок та пропозицій, які використовуються системою енергоменеджменту для запуску енергетичних транзакцій. Рівень управління енергією має справу з операційними та економічними цілями системи, що забезпечує динамічний баланс між попитом та пропозицією.

Ринковий рівень ініціює енергетичні транзакції, розглядаючи енергетичні заявки для знаходження локальної оптимальної мінімальної клірингової ціни. Комунікаційний рівень необхідний для полегшення обміну інформацією з використанням бездротових та дротових комунікаційних платформ.

Регулювання та управління роботою ТЕС здійснюється на рівні регулювання, який необхідний для забезпечення прозорості енергетичних транзакцій. У п'ятирівневій системі ТЕС відсутній рівень мережі, який необхідний для врахування втрат і перевантажень на лініях передачі та розподілу; для цього в роботі [9] запропоновано семирівневу систему ТЕС. Вона складається з рівня користувача, який взаємодіє з іншими учасниками за допомогою технології розподіленого реєстру. Мережевий рівень складається з комунікаційної та енергетичної мережі, що відповідає за динамічний баланс попиту та пропозиції.

За моніторинг роботи, аналіз та зберігання даних під час енергетичних транзакцій відповідає рівень системного оператора.

Трансактивний енергетичний ринок був запропонований для торгівлі енергією між мікромережами (МГ) і досяг балансу місцевого виробництва та споживання енергії. На трансактивному енергетичному ринку МГ-учасники зі своїми спеціальними профілями виробництва та споживання енергії можуть використовувати ринкові сигнали для обміну енергетичними послугами в мережі розподілу електроенергії. Торгівля енергією може стимулювати МГ до повного використання місцевого виробництва енергії для забезпечення доступною енергією для своїх споживачів. Трансактивний енергетичний ринок може сприяти використанню реагування на попит, коли наявні енергетичні ресурси не можуть повністю забезпечити місцеві навантаження, а імпортна енергосистема є дорогою. Відповідно, МГ можуть зміщувати некритичні навантаження для підтримки місцевого балансу електроенергії за найнижчих витрат на трансактивному енергетичному ринку.

Конфігурація Microgrids може бути визначена виходячи з потреб користувача та можливості керування режимами виробництва електроенергії.

Щоб розробити трансактивний місцевий енергетичний ринок, спочатку необхідно представити його компоненти.

Загалом компоненти поділяються на три загальні категорії: місцеві джерела енергії, структура системи розподілу та інформаційна система.

Місцеві джерела енергії: На рівні розповсюдження існує кілька можливостей розвитку та використання місцевих джерел енергії. Ці джерела енергії можуть включати різні відновлювані та невідновлювані джерела на низькому або середньому рівні напруги, а також кінцевого споживача як споживача або незалежну одиницю. Ці ресурси можуть брати участь у торгівлі енергією залежно від типу виробництва, діапазону доступності та стану мережі.

Крім того, різні системи зберігання можуть бути доступні на низькому або середньому рівні напруги як локальні джерела енергії, залежно від ситуації. Електромобілі — ще одна категорія місцевих джерел енергії, які можуть впливати на місцеві енергетичні операції. Необхідно ідентифікувати всі ці джерела енергії в різних місцях і на різних рівнях напруги системи розподілу, а також слід розглянути їхній потенціал для обміну енергією.

Структура системи розподілу: Загалом розподільчі мережі працюють на двох рівнях низької та середньої напруги. Структура більшості розподільчих мереж також радіальна. Тому використання умов живлення з двох або більше напрямків у проєкті таких мереж не розглядалося. Експлуатація структури, що живиться від місцевих джерел енергії, вимагає високих навичок, досвіду та готовності та може підвищити рівень автоматизації розподільної мережі. Ізольована робота є ще однією проблемою, з якою можна зіткнутися в мережі розподілу. Структура системи розподілу часто не готова до таких ситуацій, і якщо вона працює в автономному режимі, необхідно вжити відповідних запобіжних заходів. Довга розподільна мережа, низький коефіцієнт навантаження фідерів, відносно низька надійність мережі, сильний вплив умов навколишнього середовища та навіть серйозні зміни попиту є основними характеристиками мережі, які слід враховувати при проєктуванні місцевого ринку. операції.

Інформаційна система: Інформаційний рівень є одним із важливих компонентів впровадження місцевого ринку. При розробці такого ринку слід враховувати підготовку та передачу даних, обробку та надсилання команди точки прийняття рішень, а також належне планування. Це дозволить точно та виявити будь-які проблеми при здійсненні ринкових операцій на рівні розподілу. У делікатних і критичних ситуаціях або у випадках збоїв особи, які приймають рішення, маючи правильну інформацію, можуть запропонувати найкраще рішення для виходу з проблем, тому передача потрібного обсягу даних, які необхідно підготувати в будь-який момент або в критичні моменти, буде дуже важливою. Зважаючи на розмір розподільчої мережі, різноманітність джерел енергії та великий обсяг миттєвих даних, обов'язки постачальників даних у кожному секторі мають бути визначені таким чином, щоб під час збою та, як наслідок, час для прийняття рішень, були правильні судження та дії виконано.

Одним із ключових аспектів у вирішенні цих проблем є впровадження моніторингу та встановлення інтелектуальних лічильників. Інтелектуальні лічильники дозволяють постійно контролювати споживання електроенергії, виробництво та інші критичні параметри на рівні споживача. Збираючи та аналізуючи ці детальні дані, мережеві оператори та учасники ринку отримують глибше розуміння обмежень, характерних для слабких мереж.

Використовуючи дані інтелектуальних лічильників, оператори ринку можуть краще зрозуміти тонкощі слабких мереж і включити ці обмеження в процес оптимізації.

Оптимізація транзактивних систем.

Критерії, за якими оптимізується локальні системи, які входять до транзактивних систем, в основному поділяються на дві категорії: економічні критерії та критерії надійності [14]. Розробник системи вирішує, яким критеріям слід надати пріоритет, і вибрати рівень допуску для кожного критерію. Економічні критерії в основному стосуються вартості системи або, в деяких випадках, розміру системи, тоді як критерії надійності надають пріоритет продовженню живлення навантаження. Незважаючи на те, що перспективи мати Microgrid як чисте та екологічно чисте джерело енергії з дуже низькими витратами на технічне обслуговування та експлуатацію, початкові інвестиції, необхідні для встановлення Microgrid, є дуже високими, що робить вартість енергії (COE) і час окупності дуже високими [15].

Тому оптимізація його вартості стає основним критерієм для системного планувальника, особливо для країни, що розвивається. Встановлення великої потужності відновлюваних генеруючих одиниць для пікового навантаження (може тривати короткочасно) спричиняє значне збільшення вартості системи, оскільки потужність генеруючих одиниць збільшується, а також збільшується потужність системи зберігання. Таким чином, відповідно до попиту на навантаження, розташування та типу, можна зробити компроміс між вибраними економічними критеріями та критеріями надійності. Критерії оптимізації наведені в таблиці 1 [11, 14,15].

Таблиця 1. – критерії оптимізації

Критерій оптимізації	Математична функція	Застосування
ACS	$ACS=(TSC)\times CRF$ $TSC=\sum_{install_k}^c + \sum_{M\&O_k}^c$ $CRF = \frac{i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1}$ <p><i>TSC</i> – загальна вартість системи, включаючи технічне обслуговування та встановлення, <i>C_{install_k}</i> – вартість встановлення всіх компонентів системи, <i>C_{M&O_k}</i> – вартість обслуговування та експлуатації компонентів, <i>i</i> – ставка дисконтування, <i>L</i> – загальний термін служби системи.</p>	<p>Економічний критерій:</p> <ul style="list-style-type: none"> -вказує на щорічну вартість системи з урахуванням її технічного обслуговування, вартості встановлення та терміну служби; -найкраще підходить для великомасштабних локальних систем, де початкові інвестиції високі та більшість їх фінансується.
LCE/COE	$LCE = \frac{ACS}{E_{tot}}$ <p><i>E_{tot}</i> — загальна очікувана вироблена енергія</p> $COE = \left[\left(\frac{i \times (1+i)^L}{(1+i)^L - 1} \right) \times \left(\frac{P}{8760} \right) \right] + (M \& O)$ <p>де <i>P</i> — загальна встановлена потужність, <i>M&O</i> — витрати на обслуговування та експлуатацію системи.</p>	<p>Економічний критерій:</p> <ul style="list-style-type: none"> -показує вартість кожної одиниці енергії (кВт-год), виробленої локальною системою. -найкраще підходить для середніх і малих, підключених до мережі, щоб оцінити кількість енергії, яку потрібно запозичити від комунального підприємства, щоб зменшити розміри компонентів локальної системи, тим самим зменшуючи вартість системи та COE

Таблиця 1 (продовження)

Критерій оптимізації	Математична функція	Застосування
NPC (чиста приведена вартість)	$NPC = \sum^{NP} C_{sale_k} + \sum^{NP} C_{end_k} - C_{invest} - \sum^{NP} C_{replace_k} - \sum^{NP} C_{M\&O_k}$ <p>NPC_{sale_k} — дохід, отриманий від продажу компонентів, які підлягають заміні (для підключеної до мережі системи він також включає дохід від енергії, проданої в мережу), NPC_{end_k} — дохід, отриманий від продажу компонентів ЛЕС наприкінці життєвого циклу системи, C_{invest} — загальна вартість інвестицій, $NPC_{replace_k}$ — вартість заміни компонентів, протягом життєвого циклу установки, а $NPCM\&O_k$ — вартість обслуговування та експлуатація всіх компонентів.</p>	<p>Економічний критерій: -вказує на чисту вартість гібридної системи після закінчення належного терміну служби, що включає витрати на технічне обслуговування та експлуатацію, витрати, збережені шляхом продажу компонентів системи, а також вартість заміни компонентів системи протягом терміну служби. -підходить для всіх локальних систем Це допомагає системному планувальнику визначити, чи можна відшкодувати вартість системи для певного навантаження, якщо ні, якою буде кінцева вартість системи після продажу системних компонентів після закінчення терміну служби системи</p>
LLCB (вартість терміну служби батареї)	$LLCB = \frac{A_c}{A_{tot}} C_{ini-bat}$ <p>A_c — ефективна кумулятивна Ач, A_{tot} — загальна кумулятивна Ач протягом життєвого циклу, $C_{ini-bat}$ — початкова інвестиційна вартість акумуляторів</p>	<p>Критерій надійності -оцінює вартість акумуляторної системи накопичення включно з початковими інвестиціями та витратами на заміну батарей протягом терміну служби системи. -найкраще підходить для середніх і великих локальних систем, оскільки розмір і рейтинг одиниць зберігання є високими. Це також допомагає порівняти вартість акумуляторної системи накопичення з іншими варіантами зберігання, і прийняти зважене рішення щодо вибору правильного типу пристрою зберігання для локальної системи</p>
LPSP/LLP	$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T DE(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t) \Delta t}, \quad LLP = \frac{\sum_{t=1}^T DE(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)}$ <p>DE — дефіцит енергії, P_{load} — потреба в потужності навантаження, T — період часу, для якого необхідно розрахувати LPSP</p>	<p>Критерій надійності -вказує на ймовірність того, що локальна система не задовольняє попит на навантаження. Важливо оцінити ці критерії для локальних систем в острівному режимі роботи, особливо великомасштабні системи, що задовольняють велике навантаження.</p>
EENS	$EENS(L, P_h) = \begin{cases} L - \int_{P_{h_min}}^{P_{h_max}} P_h f_{P_h}(P_h) dP_h \rightarrow L > P_{h_max} \\ \int_{P_{h_min}}^L (L - P_h) f_{P_h}(P_h) dP_h \rightarrow P_{h_min} \leq L \leq P_{h_max} \\ 0 \rightarrow L > P_{h_min} \end{cases}$ <p>L — потреба навантаження в момент часу, P_h — потужність, що генерується ЛЕС, P_{h_max} — максимальна потужність, що генерується ЛЕС, P_{h_min} — мінімальна енергія, що генерується HRES (припускається нульовою), $f_{ph}(P_h)$ — функція ймовірності потужності від ГРЕС</p>	<p>Критерій надійності -він дає розрахункову енергію, що не постачається локальною системою до навантаження. Це хороший показник для оцінки того, чи слід локальній системі підключатися до мережі чи ні. Оцінюючи одиниці енергії, які потребує навантаження від комунального підприємства, можна прийняти розумне рішення щодо режиму роботи локальної системи.</p>

Перспективи розвитку.

Сучасні енергетичні мережі майбутнього об'єднуються з високим рівнем систем відновлюваних джерел енергії, щоб уникнути критичних проблем, пов'язаних зі звичайним електропостачанням, забезпечуючи можливість виробництва чистої електроенергії в широкому діапазоні. Крім того, що з кожним днем проникнення відновлюваних джерел енергії в систему зростає, різноманітні гібридні енергетичні системи, що виникають, вказують на необхідність взаємозалежного аналізу енергетичних мереж [16].

Таблиця 1 (продовження)

Критерій оптимізації	Математична функція	Застосування
LOL	$LOL = \sum_{t=1}^T DE(t)$	Критерій надійності -він дає точну кількість енергії, яка не постачається локальної системи до навантаження, на основі припущення, що профіль навантаження та профілі генерації ВДЕ залишаються постійними. Це найкраще підходить для невеликих систем, що обслуговують сільську місцевість. Він простий у реалізації та дає приблизну оцінку надійності системи
LA	$LA = 1 - \frac{T_{LOL}}{T_{Opt}}$ <i>T_{LOL}</i> — тривалість LOL, <i>T_{Opt}</i> — загальна тривалість роботи системи	Критерій надійності -вказує на тривалість часу, протягом якого відбувається втрата електроенергії, також базується на тих же припущеннях, що й LOL, і найкраще підходить для невеликих систем для сільських районів.
DPSP	$DPSP = \frac{\sum_{t=1}^T EPG}{\sum_{t=1}^T E_L}$ <i>EPG</i> — надлишкова вироблена потужність, <i>E_L</i> — електричне навантаження	Критерій надійності -виражається як відношення потужності, виробленої локальною системою, до потреби навантаження. -DPSP < 1, якщо вироблена електроенергія менша за попит, -DPSP > 1, якщо вироблена потужність перевищує попит. Це оцінюється для приєднаних до мережі локальних систем, де навантаження може зменшуватися протягом тривалого періоду часу, протягом якого DPSP > 1 і електроенергію можна продати. Повернувшись до комунального підприємства, це також допомагає спрогнозувати збільшення навантаження, яке може витримати локальна система протягом терміну служби, оскільки враховується ймовірність зміни попиту на навантаження.

Більшість доступних на даний момент методів побудови транзактивних систем представлені лише у вигляді моделей; немає реальної світової реалізації. Реалізовані тільки деякі концепції. Однак перш ніж таке впровадження може відбутися, важливо розробити відповідні платформи моделювання та інструменти для проведення поглибленого аналізу отриманих даних.

Труднощі, які пов'язані з багатьма різними ініціативами на основі ТЕ, включають наступне: систематичний ризик або сприйняття ризику, підготовка користувачів та економічна доцільність проекту.

Майбутні наукові роботи можуть бути структуровані таким чином, щоб глибоко підкреслити ефективну роль систем транзактивної енергетики у створенні можливостей впровадження гібридних енергетичних мереж на основі відновлюваних джерел енергії в реальному світі. Крім того, сучасна електрифікація під управлінням і контролем ТЕ може бути досліджена на різних ринкових рівнях системи, які належним чином приймають різних гравців з різних інфраструктур енергетичних мереж.

Висновки

Поняття транзактивної енергії та, відповідно, транзактивних систем було введено для сучасних енергосистем як системи економічних і керуючих механізмів, які дозволяють динамічно балансувати попит і пропозицію у всій електричній інфраструктурі з використанням вартості як ключового показника. Це забезпечує економічно ефективну інтеграцію ВДЕ та створює стимули для інвестицій та інноваційного оновлення місцевих енергетичних систем, що дозволяє управляти як пропозицією, так і попитом на електроенергію.

Підхід на основі транзактивної енергії має явні переваги над іншими типами управління інтелектуальними мережами з точки зору конфіденційності, масштабованості та економічності. Крім того, використання транзакційних або ринкових механізмів запроваджує самоорганізацію в складних системах взаємодіючих суб'єктів.

Архітектура транзактивної енергетичної системи має децентралізовану форму, основною ідеєю якої є досягнення операційних та економічних цілей за допомогою скоординованої інтеграції виробників, споживачів.

Список використаної літератури

1. Khorasany, Mohsen, Donald Azuatalam, Robert Glasgow, Ariel Liebman, and Reza Razzaghi. 2020. "Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study" *Energies* 13, no. 8: 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>
2. Widergren, S.E.; Hammerstrom, D.J.; Huang, Q.; Kalsi, K.; Lian, J.; Makhmalbaf, A.; McDermott, T.E.; Sivaraman, D.; Tang, Y.; Veeramany, A.; et al. *Transactive Systems Simulation and Valuation Platform Trial Analysis; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2017.*
3. Melton, R. *Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project Technology Performance Report Volume 1: Technology Performance; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2015.*
4. Holmberg, D.G.; Hardin, D.; Melton, R.; Cunningham, R.; Widergren, S. *Transactive Energy Application Landscape Scenarios; Technical Report; NIST: Gaithersburg, MD, USA, 2016.*
5. Orsini, L.; Kemenade, C.; Webb, M.; Heitmann, P. *Transactive Energy A New Approach for Future Power Systems. LO3 Energy. 2019. Available online: <https://exergy.energy/wp-content/uploads/2019/03/TransactiveEnergy-PolicyPaper-v2-2.pdf> (accessed on 27 March 2020).*
6. Huang, Qi & Amin, Waqas & Umer, Khalid & Afzal, Muhammad. (2021). A review of transactive energy systems: Concept and implementation. *Energy Reports*. 7. 10.1016/j.egy.2021.05.037.
7. Honarmand, Mohammad & Hosseinezhad, Vahid & Hayes, Barry & Siano, Pierluigi. (2021). Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. <https://doi.org/14.3110.10.3390/en14113110>
8. Zahraoui, Y.; Alhamrouni, I.; Mekhilef, S.; Basir Khan, M.R.; Seyedmahmoudian, M.; Stojcevski, A.; Horan, B. (2021) *Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. Sustainability*, 13, 10492. <https://doi.org/10.3390/su131910492>
9. Khorasany, Mohsen & Azuatalam, Donald & Glasgow, Robert & Liebman, Ariel & Razzaghi, Reza. (2020). *Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. Energies*. 13. 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>.
10. Белоха Г.С. Оптимізація технікоеконімічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням [Електронний ресурс] : монографія / Г. С. Белоха ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,01 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 127 с <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56855>
11. Siano, P.; De Marco, G.; Rolán, A.; Loia, V. A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Syst. J.* 2019, 13, 3454–3466. [CrossRef]
12. Zia, M.F.; Elbouchikhi, E.; Benbouzid, M.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy systems: a perspective on design, technologies, and energy markets. In *Proceedings of the IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE*
13. Zia, M.F.; Benbouzid, M.; Elbouchikhi, E.; Muyeen, S.; Techato, K.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access* 2020, 8, 19410–19432. [CrossRef]
14. Chen, Jun; Garcia, Humberto E. (2016). Economic optimization of operations for hybrid energy systems under variable markets. *Applied Energy*, 177, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.056>
15. S. Rehman, N. Natrajan, M. Mohandes, L. M. Alhems, Y. Himri and A. Allouhi (2020), "Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, India," in *IEEE Access*, 8, 143881-143890, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.
16. Lin, Y., Wang, J. Realizing the Transactive Energy Future with Local Energy Market: an Overview. *Curr Sustainable Renewable Energy Rep* 9, 1–14 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00198-0>

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

M. Taraba¹, Ph. D. student, ORCID 0009-0000-0431-3942

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

TRANSACTIVE LOCAL ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS: FUNCTIONING FEATURES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Due to global concerns about climate change, the deployment of distributed energy resources and electrical and thermal energy storage systems has been accelerated to minimize CO2 emissions. In addition, the need for optimal energy management of these energy resources was emphasized in order to reduce the need for new energy

resources. The concept of transactional energy and, accordingly, transactional systems was introduced for modern energy systems as a system of economic and control mechanisms that allow for dynamic balancing of supply and demand in the entire electrical infrastructure using cost as a key indicator. This ensures cost-effective integration of renewable energy sources and creates incentives for investment and innovative renewal of local energy systems, allowing for management of both supply and demand for electricity. The article discusses the architecture of transactional systems and its components. The main objective function of transactional systems is to minimize the total annual costs of the local system, which supports the continuity of energy supply. To estimate the current cost of electricity, it is necessary to have information on the distribution of investments invested in the project before the start of its implementation, between the periods of project implementation. Considered optimization criteria, the use of which depends on specific goals. It is important to use multi-criteria optimization and control methods to determine the structure of the system and the optimal distribution of energy obtained from different sources in order to maximize the efficiency of the entire system, while contributing to the maximum reduction of emissions to the environment, while minimizing the cost of energy production.

Keywords: *transactive energy, Microgrid, local energy markets, renewable sources, distributed sources*

References

1. Khorasany, Mohsen, Donald Azuatalam, Robert Glasgow, Ariel Liebman, and Reza Razzaghi. 2020. "Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study" *Energies* 13, no. 8: 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>
2. Widergren, S.E.; Hammerstrom, D.J.; Huang, Q.; Kalsi, K.; Lian, J.; Makhmalbaf, A.; McDermott, T.E.; Sivaraman, D.; Tang, Y.; Veeramany, A.; et al. *Transactive Systems Simulation and Valuation Platform Trial Analysis*; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2017.
3. Melton, R. Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project Technology Performance Report Volume 1: Technology Performance; Technical Report; Pacific Northwest National Lab. (PNNL): Richland, WA, USA, 2015.
4. Holmberg, D.G.; Hardin, D.; Melton, R.; Cunningham, R.; Widergren, S. *Transactive Energy Application Landscape Scenarios*; Technical Report; NIST: Gaithersburg, MD, USA, 2016.
5. Orsini, L.; Kemenade, C.; Webb, M.; Heitmann, P. *Transactive Energy A New Approach for Future Power Systems*. LO3 Energy. 2019. Available online: <https://exergy.energy/wp-content/uploads/2019/03/TransactiveEnergy-PolicyPaper-v2-2.pdf> (accessed on 27 March 2020).
6. Huang, Qi & Amin, Waqas & Umer, Khalid & Afzal, Muhammad. (2021). A review of transactive energy systems: Concept and implementation. *Energy Reports*. 7. 10.1016/j.egy.2021.05.037.
7. Honarmand, Mohammad & Hosseinezhad, Vahid & Hayes, Barry & Siano, Pierluigi. (2021). Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. <https://doi.org/14.3110.10.3390/en14113110>
8. Zahraoui, Y.; Alhamrouni, I.; Mekhilef, S.; Basir Khan, M.R.; Seyedmahmoudian, M.; Stojcevski, A.; Horan, B. (2021) Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 13, 10492. <https://doi.org/10.3390/su131910492>
9. Khorasany, Mohsen & Azuatalam, Donald & Glasgow, Robert & Liebman, Ariel & Razzaghi, Reza. (2020). *Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study*. *Energies*. 13. 2010. <https://doi.org/10.3390/en13082010>.
10. Белоха Г.С. Оптимізація технікоекономічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням [Електронний ресурс] : монографія / Г. С. Белоха ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,01 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 127 с <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/56855>
11. Siano, P.; De Marco, G.; Rolán, A.; Loia, V. A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Syst. J.* 2019, 13, 3454–3466. [CrossRef]
12. Zia, M.F.; Elbouchikhi, E.; Benbouzid, M.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy systems: a perspective on design, technologies, and energy markets. In *Proceedings of the IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE*
13. Zia, M.F.; Benbouzid, M.; Elbouchikhi, E.; Mueen, S.; Techato, K.; Guerrero, J.M. Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access* 2020, 8, 19410–19432. [CrossRef]
14. Chen, Jun; Garcia, Humberto E. (2016). Economic optimization of operations for hybrid energy systems under variable markets. *Applied Energy*, 177, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.056>
15. S. Rehman, N. Natrajan, M. Mohandes, L. M. Alhems, Y. Himri and A. Allouhi (2020), "Feasibility Study of Hybrid Power Systems for Remote Dwellings in Tamil Nadu, India," in *IEEE Access*, 8, 143881-143890, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.
16. Lin, Y., Wang, J. Realizing the Transactive Energy Future with Local Energy Market: an Overview. *Curr Sustainable Renewable Energy Rep* 9, 1–14 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00198-0>

Надійшла: 30.10.2023

Received: 30.10.2023

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 697.1

DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290892

Є.О. Микита¹, аспірант, ORCID 0000-0001-6698-7555
В.І. Дешко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933
¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗПОДІЛЬНИЙ ОБЛІК ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОПАЛЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКІВ: ТЕХНІЧНІ, МЕТОДИЧНІ, ПОВЕДІНКОВІ АСПЕКТИ

В даній статті проведено критичний аналіз технічної літератури, методичні вказівки і правила, науковий доробок українських та іноземних фахівців щодо аспектів організації розподільного обліку теплової енергії на опалення в багатоквартирних будинках з вертикальними системами опалення. Важливим етапом стратегії підвищення енергетичної ефективності будівлі є організація індивідуального контролю за споживанням енергії. Для організації індивідуального контролю за споживанням опалення в будівлях з вертикальними системами опалення набувають поширення системи розподільного обліку теплової енергії. В рамках даного дослідження б виявлено ряд аспектів та недоліків в технічних стандартах і нормативно-правових актах, що регламентують правила організації розподільного обліку. Визначено три групи аспектів: технічні – пов'язані з обґрунтуванням використання методу розподілу витрат на опалення відповідно до типів обліку, вимірювання температури, правил місця встановлення приладів, та наявністю суттєвої кількості поправкових коефіцієнтів; методичні – правила організації та проведення зняття показів, інтерпретація та врахування поправкових коефіцієнтів, суттєві спрощення при визначенні важливих коригувальних коефіцієнтів, відсутність методичного забезпечення запобіганню зловживанням споживачами з індивідуальними системами опалення у будівлях; поведінкові – можливість відслідковувати власну економію, мотивація до індивідуального регулювання, наявність індивідуального контролю за споживанням опалення без належного контролю дотримання температурного режиму і перетоків між квартирами спричиняє можливість безконтрольного паразитного споживання теплової енергії за рахунок сусідів. Сформульовані аспекти і недоліки наявної системи організації розподільного обліку потребують поглибленого вивчення задля уникнення необґрунтованих спрощень, покращення точності системи, підвищення справедливого розподілу оплати за спожиту теплову енергію між абонентами.

Ключові слова: розподільвачі теплової енергії, розподільний облік опалення, паразитні перетоки, індивідуальний контроль споживання, індивідуальний облік, вертикальні системи опалення.

Вступ

З підписанням угод щодо асоціації України з Європейським союзом, розпочалась імплементація законодавства ЄС в різних галузях, зокрема в галузі енергетичної ефективності будівель. Підвищились вимоги до оболонки будівлі, та ефективності інженерних систем. Розпочалось формування системи сертифікації енергоефективності будівель. Для стимулювання залучення громадян до впровадження заходів з підвищення енергоефективності їх житлових будівель, було створено ряд програм державного та місцевого співфінансування. Зокрема, сформовано державну установу «Фонд енергоефективності», ключовим завданням якого є створення та управління програмами державного співфінансування термомодернізації багатоквартирних будинків. В рамках програми було сформульовано достатньо комплексну та гнучку стратегію термомодернізації будівлі, на основі пакетів заходів з підвищення енергоефективності [1].

Зокрема, в рамках програми наявні заходи з організації систем розподільного обліку теплової енергії на опалення, приладів-розподільвачів теплової енергії [2].

Можливість деталізованого індивідуального контролю споживання енергії споживачами є одним з найважливіших елементів стратегії підвищення енергетичної ефективності будівлі. Контроль споживання енергії слід розглядати як системний процес, що поєднує дві складові – **облік** спожитої енергії, та **регулювання** споживання.

Сучасні найкращі технічні рішення для регулювання споживання теплової енергії на опалення є достатньо розповсюдженими, недорогими і ефективними. Застосування радіаторних терморегуляторів з достатньою точністю дозволяють організувати складову регулювання споживання на рівні окремого приладу опалення, що інструментально є найбільш детальним способом організації регулювання.

Складова обліку у більшості багатоквартирних будинків організована на рівні всієї будівлі у вигляді лічильника комерційного обліку, з розподіленням оплати за споживання теплової енергії між споживачами пропорційно площі їх приміщень. Без складової обліку на рівні окремого споживача відсутня мотивація до економії, так як дана економія майже не відобразиться на оплаті за теплову енергію, а розподілиться серед усіх споживачів. Для багатоквартирних будинків відносно сучасного будівництва з горизонтальною системою опалення і поквартирним введенням встановлюють лічильники теплової енергії на кожен квартиру, додатково до центрального комерційного. Але в будинках з вертикальними системами опалення для складової обліку споживання досить складно досягти індивідуального рівня, не втрачаючи при цьому точність чи економічну привабливість технічного рішення [3].

З 2018 року в Україні з введенням Порядку визначення технічної можливості встановлення вузлів розподільного обліку теплової енергії та економічної доцільності встановлення приладів — розподільовачів теплової енергії [4] та Методики розподілу між споживачами обсягів спожитих у будівлі комунальних послуг [5] з'являється регуляторна база і починається застосування рішень з розподільного обліку теплової енергії в багатоквартирних будинках.

Мета – дослідити технічну літературу, нормативно-правові акти, доробок вітчизняних та іноземних науковців за темою організації розподільного обліку споживання теплової енергії на опалення в багатоквартирних будинках, сформулювати ключові технічні, методичні, поведінкові аспекти організації розподільного обліку.

Завдання – проаналізувати фактори, що впливають на якість, точність та справедливість розподілу, оцінити актуальність та обмеженість розвитку систем розподільного обліку.

Прилади-розподільовачі обліку теплової енергії

Традиційним методом розподілу оплати за теплову енергію на опалення в багатоквартирних будівлях з вертикальною системою опалення є пропорційне розділення показників загальнобудинкового лічильника відносно площі приміщень, власником яких є окремий абонент-споживач теплової енергії.

Даний метод не враховує конфігурацію системи опалення, різні розміри приладів опалення, можливість індивідуального регулювання споживанням.

Найновий ряд технічних непрямих методів, зокрема експериментальний метод за фіксуванням часу положення радіаторного терморегулятора, або так званий TRV-метод. Великого застосування даний метод не набув, за експериментальними дослідженнями має більшу похибку визначення частки теплової енергії, відносно інших технічних методів [6].

Найбільш розповсюдженим технічним способом розподілення оплати між споживачами є непрямого методу з застосуванням спеціалізованих приладів-розподільовачів теплової енергії (рис. 1).



Рисунок 1 – Прилад-розподільовач обліку теплової енергії [7]

Технічний стандарт, що обумовлює основні вимоги до приладів-розподільовачів теплової енергії - ДСТУ EN 834:2017 [8]. Даний стандарт регламентує умови сертифікаційних випробувань розподільовачів, правила монтажу та експлуатації.

В приладах з одним датчиком температури вимірюється лише температура на поверхні радіатора, температура в приміщенні встановлюється умовно сталою за нормами (18-20 °С), що впливає на точність розподілу. В системі з двома датчиками температури, другий датчик розміщується в приміщенні для реєстрації температури внутрішнього повітря приміщення. Встановлення на секційні радіатори відбувається неінвазивним методом без зупинки експлуатації системи опалення, за допомогою притискної пластини [8]. Точку встановлення розподільвача визначають: по висоті радіатора - регламентовано як $\frac{3}{4}H$ від нижнього краю радіатора; по горизонталі - середина або наближена до середини точка, якщо радіатор несиметричний [8]. Графічне відображення визначення точки встановлення розподільвача наведено на рисунку 2.

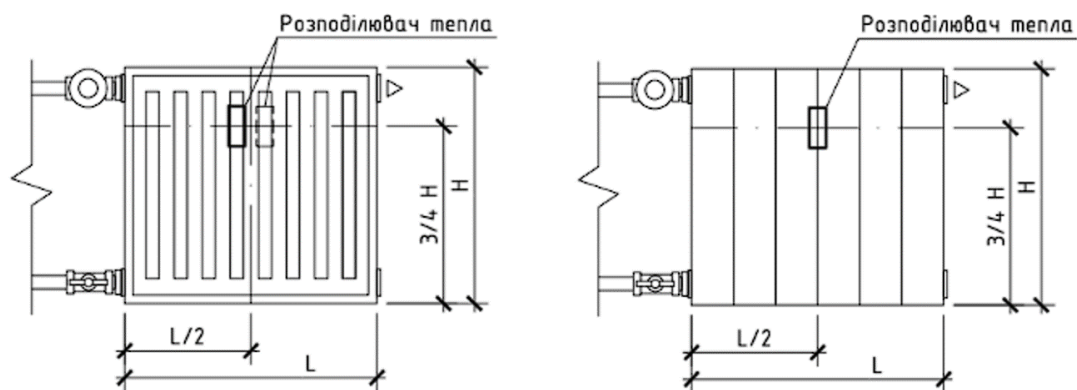


Рисунок 2 – Графічне відображення визначення точки встановлення розподільвача
а) на панельний радіатор; б) на секційний радіатор [9]

Слід зазначити, що наявне правило встановлення не враховує фактичний стан радіатора, його потенційну засміченість, спосіб підключення радіатора до системи опалення.

Живлення пристроїв відбувається від одноразового джерела живлення, що забезпечує безупинну роботу приладу протягом 10 років.

Розподільвач обліку теплової енергії не можна відносити до категорії лічильників, так як в основі роботи приладу відсутні обидві складові рівняння теплового балансу – витрати теплоносія, і різниці температур теплоносія на контрольному вході і виході. Формулювання принципу дії приладу – прилад-розподільвач не визначає конкретну частку від споживання, лише інтеграл різниці температур між точкою на радіаторі і датчиком температури приміщення. Цю величину можна використати як непрямий, але визначальний параметр для порівняння теплових потоків різних радіаторів [8].

Показники цих приладів – це умовні одиниці, поясненням цих одиниць можна назвати «температуро-години» за вимірюваними величинами і логікою накопичення даних. Реєстрація даних з датчиків відбувається раз на кілька хвилин, залежно від конфігурації приладу.

Зчитування накопичених даних показів відбувається за допомогою допоміжних пристроїв, проміжних концентраторів даних та центрального блоку, з періодичністю мінімум один раз на місяць. Приклад розташування проміжних концентраторів та зона їх радіозв'язку наведені на рисунку 3.

Білінгова компанія, що на договірних засадах виконує обслуговування розподільвачів, зняття і опрацювання показників, зазвичай отримує фіксовану оплату за свої послуги один раз на місяць з кожної квартири (тобто з кожного абонента, зазвичай незалежно від кількості розподільвачів в квартирі).

Приклад зібраних показів з приладів-розподільвачів для однокімнатної квартири в багатоквартирному будинку за опалювальний період 2021-2022 наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Приклад показів розподільвачів для однокімнатної квартири за опалювальний період 2021-2022.

Приміщення	Жовтень 2021	Листопад 2021	Грудень 2021	Січень 2022	Лютий 2022	Березень 2022	Квітень 2022
Кухня	27	364	557	581	307	324	103
Кімната	25	202	501	714	640	439	122

В Україні наразі застосування даного типу розподільного обліку не є обов'язковою вимогою, тому не має великого поширення застосування. Наявні дані від Фонду енергоефективності, щодо ОСББ, які брали участь у програмі співфінансування впровадження заходів з підвищення енергоефективності

«Енергодім», і планували в рамках проектів термомодернізації впроваджувати заходи зі встановлення приладів-розподільвачів теплової енергії.

Станом на 2023 рік, з 898 заявок, близько 80 заявок містили захід з організації розподільного обліку теплової енергії на опалення в переліку впровадження на різних стадіях проекту – від початкової ініціації проекту до підтвердження повного впровадження заходів [10].

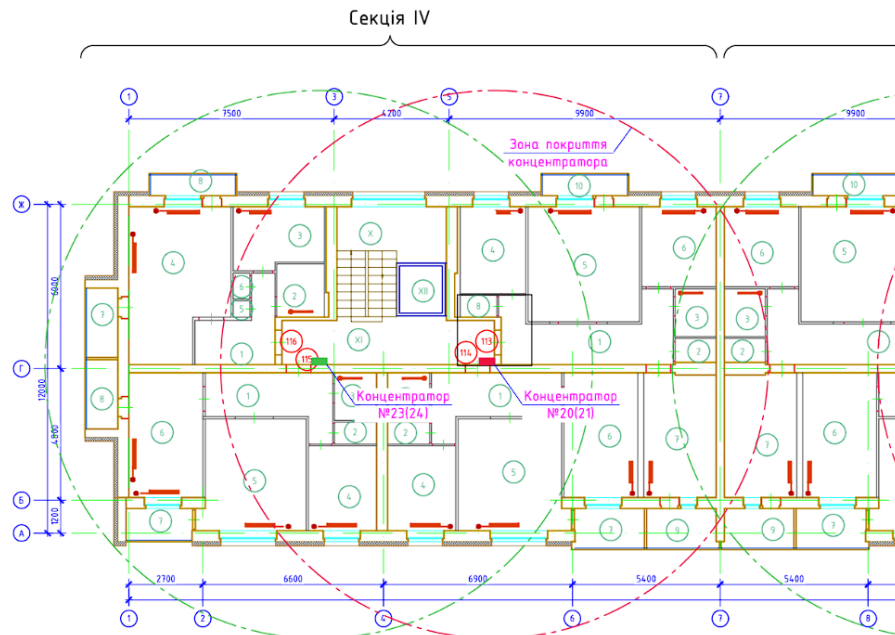


Рисунок 3 – Графічне визначення місць встановлення концентраторів даних на поверховому плані будівлі [9]

Методичні аспекти організації розподільного обліку

Наростаючий інтерес до впровадження даних систем спонукає до детального і всебічного дослідження аспектів роботи цих систем. Так як розподільвачі обліку теплової енергії не є безпосереднім засобом обліку теплової енергії, основні принципи розподілу будуються в першу чергу на умовностях і логічних припущеннях, а не прямих технічних вимірюваннях. Загальний алгоритм інтерпретації показників:

- 1) Виділення $Q_{фсо}$ та $Q_{мзк}$;
- 2) Коригування показів розподільвачів відповідно до поправкових коефіцієнтів на прилад, на розташування приміщення;
- 3) Пропорційний розподіл спожитої теплової енергії відповідно до скоригованих показів розподільвачів;
- 4) Визначення середнього питомого споживання;
- 5) Визначення мінімальної нормативної частки від середнього споживання;
- 6) Донарахування спожитої теплової енергії споживачам з нижчим від мінімальної частки споживанням;
- 7) Перерахунок надлишкових часток споживання для споживачів вище мінімальної частки [5].

Першим етапом інтерпретації показників розподільного обліку є умовне виокремлення спожитої теплової енергії, що обліковується комерційним лічильником, але не відноситься до жодного споживача. Такими складовими теплової енергії є тепла енергія для забезпечення функціонування внутрішньобудинкової системи опалення (далі – ФСО) $Q_{фсо}$, та тепла енергія на опалення місць загального користування (далі – МЗК) $Q_{мзк}$ (у випадку відсутності розподільвачів теплової енергії на приладах опалення в МЗК). Зазвичай ці складові приймають умовно постійними, оплата за постійні складові відбувається класичним способом, пропорційно площі приміщень окремого споживача [5].

Частка теплової енергії на опалення квартир визначається за формулою:

$$Q_{пр-роз} = Q_{оп}^{буд} - Q_{фсо} - Q_{мзк} \text{ ,де:}$$

$Q_{пр-роз}$ – сума споживання всіх квартир в розрахунковий період, Гкал;

$Q_{оп}^{буд}$ – загальне будинкове споживання тепла, Гкал.[3]

В методиці наводиться спосіб визначення теплової енергії на опалення МЗК як деякої умовної відсоткової частки від споживання теплової енергії за комерційним лічильником. В таблиці 2 наведено запропоновані в Методиці значення відсотків в залежності від поверховості будівлі [5].

Таблиця 2 – Частка споживання теплової енергії на опалення МЗК

Поверховість будівлі	% від загального споживання
1	20%
2	18%
3	16%
4	14%
5	12%
6 і вище	10%

Слід зазначити, що в методиці вказано, що альтернативою використання укрупнених показників, може бути визначення цих складових в рамках комплексного енергетичного аудиту будівлі. Але не наводяться методичні рекомендації щодо імплементації визначених складових в процедуру розподілення, а також відсутнє коректне визначення такого типу енергетичного аудиту будівлі, відсутні нормативні документи щодо коректного визначення предмету виконання такого типу енергетичного аудиту, який відповідав би зазначеній меті.

Складова теплової енергії на функціонування системи опалення відповідно до Методики також визначається як відсоткове значення від споживання за комерційним лічильником в залежності від конфігурації системи опалення. Складові споживання на ФСО наведені в таблиці 3 [5].

Таблиця 3 – Відсоткові складові споживання теплової енергії на функціонування системи опалення

Характеристика системи опалення	% від загального споживання
Індивідуальний тепловий пункт без регулювання за погодними умовами	15%
Індивідуальний тепловий пункт при регулюванні за погодними умовами	5%
Автономна теплогенеруюча/когенераційна установка	7%
Центральний тепловий пункт або теплогенеруюча/когенераційна установка, яка не є автономною	8%
Квартирні/малі індивідуальні теплові пункти (за умови обладнання квартирними/малими індивідуальними тепловими пунктами всіх приміщень будівлі)	4%

Відсутність залежності розміру частки споживання від протяжності трубопроводів в неопалюваних приміщеннях, також не враховано стан теплової ізоляції даних трубопроводів.

Наступний етап – врахування поправкових коефіцієнтів показів приладів-розподілювачів на тип та розмір радіатора і на розташування приміщення в будівлі [11]:

$$q_{\text{пр-розп}}^i = N_i \times L_i \times P_i \times K_i, \text{ де:}$$

$q_{\text{пр-розп}}^i$ – споживання і-го радіатора в розрахунковий період,

N_i – кількість умовних одиниць на розподілювачі, що встановлено на і-му радіаторі в розрахунковий період;

L_i – типорозмір і-го радіатора;

P_i – питома потужність типорозміру і-го радіатора, приймається по паспортним даним радіатора;

K_i – поправковий коефіцієнт, в залежності від розташування приміщення в будівлі [11].

Для врахування поправки на розташування приміщення, в якому встановлено розподілювач, застосовуються укрупнені поправкові коефіцієнти, які наведено в таблиці 4 [5].

Поправка на тип і розмір опалювального приладу відбувається за паспортними характеристиками радіатора і не враховує змінність гідравлічного режиму, варіант підключення радіатора і потенційне засмічення реального радіатора опалення.

Наступним кроком є визначення середнього питомого споживання теплової енергії на опалення $q^{\text{оп}}$, Гкал/м² [5].

На жаль при наявності індивідуального контролю виникає можливість для зловживання регулюванням, а саме перекриттям протоку теплоносія через радіатор, і підтримання деякої достатньої температури в окремих приміщеннях квартири за рахунок так званих «паразитних» перетоків теплової енергії від суміжних приміщень сусідів. Для запобігання таких випадків наявні технічні та методичні механізми. Відповідно до п.6.7.25 та п.5.3 ДБН «Опалення, вентиляція та кондиціонування», при застосуванні автоматичних терморегуляторів в житлових будівлях допускається використання приладів, що мають заблоковане, чи обмежене мінімальне положення налаштувань температури повітря на рівні 12-14 °С (та максимальне обмежене положення на рівні 24 °С) [12].

Таблиця 4 – Поправкові коефіцієнти K_i на розташування приміщення в будівлі

Поверх	Поправковий коефіцієнт	
	кутової квартири (приміщення)	рядової квартири (приміщення)
Перший над неопалюваними приміщеннями	0,8	0,9
Перший над опалюваними приміщеннями	0,9	1
Середній	0,9	1
Середній над аркою або проїздом	0,9	0,9
Останній	0,8	0,9

Методика розподільного обліку передбачає обов'язкові донарахування показників до рівня мінімальної частки середнього питомого споживання (40-50%), якщо показники розподільовачів споживача нижчі за даний рівень [5].

Мінімальна частка $q_{min}^{оп}$ середнього питомого споживання визначається за формулою:

$$q_{min}^{оп} = 0,5 \cdot q^{оп}, \frac{\text{Гкал}}{\text{м}^2}.$$

Донарахування для опалюваного приміщення, оснащеного приладами-розподільовачами теплової енергії:

$$Q_{пр.г}^{дон} = \left(q_{min}^{оп} - \frac{Q_{пр.г}^{пр-роз}}{S_{пр.г}} \right) \cdot S_{пр.г}, \text{Гкал, якщо } \frac{Q_{пр.г}^{пр-роз}}{S_{пр.г}} < q_{min}^{оп}.$$

Через виконане нарахування, загальна сума значень розподіленої теплової енергії буде вищою за визначену комерційним лічильником. Відповідно дане перевищення згідно з методикою можна скоригувати і перерозподілити як зменшення нарахувань для приміщень, в яких не було донарахувань [11].

Результуючі сумарні перерозподілені покази для окремого споживача є розподіленою тепловою енергією на опалення, за яке необхідно виконати розрахунок з теплопостачальною організацією. Приклад помісячних значень розподіленої теплової енергії на опалення для однокімнатної квартири за опалювальний сезон 2021-2022 наведено у таблиці 5.

Таблиця 5 – Розподілена тепла енергія на опалення квартири за опалювальний період 2021-2022

	Жовтень 2021	Листопад 2021	Грудень 2021	Січень 2022	Лютий 2022	Березень 2022	Квітень 2022
Теплова енергія на опалення, Гкал	0,050	0,314	0,669	0,750	0,503	0,510	0,102

Декілька ключових методичних параметрів безпідставно вирішуються загальними зборами ОСББ, без попередніх консультацій та проведення технічних розрахунків професійними фахівцями, інженерами для кожної будівлі окремо.

В методиці відсутнє обґрунтування рівня мінімальної частки від середнього питомого споживання на рівні 40-50%. Без прив'язки до дотримання теплового комфорту і контролю перетоків, неможливо справедливо визначити рівень мінімального нормативного споживання теплової енергії окремою квартирою, відповідно до якого можна виконувати перерахунки.

В методиці не передбачено будь-яким чином відслідковування споживання теплової енергії в приміщеннях з індивідуальними системами опалення. Щодо причин встановлення індивідуального опалення в багатоквартирних будівлях можна констатувати, що основною свідомою чи несвідомою причиною є власне можливість зловживати «паразитними» перетоками теплової енергії від сусідніх квартир. Тому важливо дослідити можливість розширення методики з урахуванням перетоків до квартир з індивідуальним опаленням [13].

Аналіз іноземного досвіду та досліджень науковців

В більшості країн ЄС було впроваджено обов'язкове застосування приладів-розподільвачів за умови технічної та економічної доцільності, але в деяких країнах (Швеція та Фінляндія) після накопичення досвіду застосування, було вирішено відмінити дану вимогу [14].

Найявні експериментальні дослідження роботи системи розподільного обліку італійськими науковцями висвітлюють аспекти відносної точності підходу з використанням приладів-розподільвачів. На великій експериментальній установці в Національному метрологічному інституті Італії (м. Турин), що відтворювала систему опалення, на кожному радіаторі було встановлено повноцінний лічильник теплової енергії, і прилад-розподільвач. Одночасно фіксувались покази лічильників та приладів-розподільвачів, з подальшою обробкою. Результати порівняння – середнє відхилення становило біля 8,1% з розкидом значень від 4,9 до 37,7 %. Але додатковий аналіз даних встановив, що при однакових типорозмірах радіаторів, відхилення вимірювань складали від 2,7 до 4,9 % [6].

Ряд дослідників вказують на суттєвий рівень паразитних перетоків між приіщеннями в багатоквартирних будинках: дослідження 24-квартирного будинку в м. Краєгувац (Сербія) виявило, неопалюване приміщення може отримати до 80% потреби в тепловій енергії на опалення, виключно через дані перетоки [13]. Через вищезазначену проблему є необхідність додаткових досліджень, формування та імплементації правил врахування і контролю за паразитними перетоками до квартир, що приєднані до системи опалення, але не встановили прилади-розподільвачі, а також особливо приміщення, обладнані індивідуальним опаленням, які слід досить умовно вважати відокремленими від загальнобудинкової системи опалення.

Висновки

Було проведено критичний аналіз нормативної літератури, наукові статті українських та іноземних фахівців щодо аспектів організації розподільного обліку теплової енергії на опалення в багатоквартирних будинках з вертикальними системами опалення. В результаті аналізу було виявлено ряд аспектів та недоліків в технічних стандартах, практиках застосування і нормативно-правових документах, що регламентують організацію розподільного обліку.

Було зазначено ключові технічні, методичні та поведінкові недоліки та недосконалості в описаному технічному рішенні розподільного обліку, а саме:

- Відсутня однозначність у коректності застосування обраних фізичних величин для формування системи розподільного обліку;
- Велика кількість поправкових коефіцієнтів, що збільшують неточність розподілу;
- Значна частина поправкових коефіцієнтів різних факторів є занадто укрупненими, а частина коефіцієнтів, що є технічними і мають визначатись внаслідок інженерних розрахунків, визначаються рішенням самих мешканців;
- Відсутність відслідковування впливу споживачів, що не входять в систему розподільного обліку і мають індивідуальні системи опалення.

Важливим є подальше дослідження технічних, методичних та поведінкових факторів розподільного обліку теплової енергії, пошуку нових технічних рішень для покращення рівня точності, економічної привабливості та справедливості розподілу.

Список використаної літератури

1. Закон України «Про Фонд енергоефективності» від 08.06.2017 № 2095-VIII.
2. Заходи з підвищення енергоефективності будівель програми «Енергодім». Режим доступу: <https://energodim.org/detalna-informatsiia/>
3. Проценко. С.Б. Оцінка способів поквартирного обліку споживання тепла на опалення в багатоквартирних житлових будинках / Вісник Національного університету водного господарства та природокористування, Випуск 1(69) 2015р.
4. Про затвердження Порядку визначення технічної можливості встановлення вузлів розподільного обліку теплової енергії та економічної доцільності встановлення приладів - розподільвачів теплової енергії: Постанова Кабінету Міністрів України від 10 жовтня 2018 р. № 829.
5. Про затвердження Методики розподілу між споживачами обсягів спожитих у будівлі комунальних послуг: Наказ міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України №315 від 22 листопада 2018. Зареєстрована у Міністерстві юстиції України 28 грудня 2018 року за № 1502/32954. 29 с.
6. F. Saba, V. Fericola, M.C. Masoero, S. Abramo, Experimental analysis of a heat cost allocation method for apartment buildings, Buildings 7 (2017) 20.
7. <https://metra-su.cz/cs/produkt/elektronicky-indikator-topnych-nakladu-e-itn-30-s-integrovanym-radiovym-vysilacem>.

8. ДСТУ EN 834:2017. Вимірювачі витрат тепла для визначення тепловіддачі кімнатних опалювальних батарей. Прилади з електроживленням (EN 834:2013, IDT). [Чинний від 2017-01-08]. Вид. офіц. Київ: Національний орган стандартизації ДП "УкрНДНЦ", 2017. 31 с.

9. Проєкти повторного використання. Режим доступу: <https://eefund.org.ua/druga-chastina-proektiv-povtornogo-vikoristannya-dlya-proektuvalnikiv>

10. Моніторинг проєктів участі в програмі «Енергодім». Режим доступу: <https://sites.google.com/eefund.org.ua/monitoring/>

11. Гончаров Н.С. Розподіл споживання теплової енергії в багатоквартирному будинку з використанням приладів-розподільовачів: маг. дис./ Н.С. Гончаров; Мін-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2020. www.ela.kpi.ua.

12. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Вид. офіц. Київ: Державні норми України, 2013. 240 с.

13. N. Lukic', N. Nikolic', S. Timotijevic', S. Tasic', Influence of an unheated apartment on the heating consumption of residential building considering current regulations—case of Serbia, Energy Build. 155 (2017) 16–24.

14. L. Canale , M. Dell'Isola, G. Ficco , T. Cholewa, S. Siggelsten , I. Balen. A comprehensive review on heat accounting and cost allocation in residential buildings in EU. Energy & Buildings 202 (2019).

Y. Mykyta¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-6698-7555

V. Deshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

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

DISTRIBUTION ACCOUNTING OF HEAT ENERGY FOR HEATING OF APARTMENT BUILDINGS: TECHNICAL, METHODOLOGICAL, BEHAVIORAL ASPECTS

In this paper, a critical analysis of technical literature, methodological guidelines and rules, scientific work of Ukrainian and foreign experts on aspects of the organization of distribution accounting of thermal energy for heating in multi-apartment buildings with vertical heating systems is carried out. An important stage of the strategy for improving the building's energy performance is to organize individual control of energy consumption. For the organization of individual consumption control for heat energy in buildings with vertical heating systems, distribution accounting systems for thermal energy are becoming widespread. Within the framework of this study, a number of aspects and shortcomings in technical standards and legal acts regulating the rules for the organization of distributive accounting would be revealed. Three groups of aspects are defined: technical - related to the justification of using the method of distribution of heating costs according to the types of accounting, temperature measurement, rules for the place of installation of devices, and the presence of a significant number of correction coefficients; methodical - rules for organizing and conducting screenings, interpretation and consideration of correction coefficients, significant simplifications in determining important correction coefficients, lack of methodical provision to prevent abuse by consumers with individual heating systems in buildings; behavioral - the ability to monitor one's own savings, motivation for individual regulation, the presence of individual control over heating consumption without proper control of the temperature regime and flows between apartments causes the possibility of uncontrolled parasitic consumption of thermal energy at the expense of neighbors. Formulated aspects and shortcomings of the existing distribution accounting system require in-depth study in order to avoid unreasonable simplifications, improve the accuracy of the system, and increase the fair distribution of payment for consumed thermal energy among consumers.

Keywords: heat cost allocators, distribution accounting of heat energy, "parasitic" heat flows, individual control of consumption, individual accounting, vertical heating systems.

References

1. Law of Ukraine "On the Energy Efficiency Fund" dated June 8, 2017 No. 2095-VIII.
2. Measures to increase the energy efficiency of buildings of the "Energodim" program. Access mode: <https://energodim.org/detalna-informatsiia/>
3. Protsenko. S.B. Evaluation of methods of apartment-by-apartment accounting of heat consumption for heating in multi-apartment residential buildings / Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management, Issue 1(69) 2015.

4. On the approval of the Procedure for determining the technical feasibility of installing heat energy distribution metering units and the economic feasibility of installing devices - heat energy distributors: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 10, 2018 No. 829.

5. On the approval of the Methodology for distributing among consumers the volumes of utility services consumed in the building: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 315 of November 22, 2018. Registered in the Ministry of Justice of Ukraine on December 28, 2018 under No. 1502/32954. 29 p.

6. F. Saba, V. Fericola, M.C. Masoero, S. Abramo, Experimental analysis of a heat cost allocation method for apartment buildings, *Buildings* 7 (2017) 20.

7. <https://metra-su.cz/cs/produkt/elektronicky-indikator-topnych-nakladu-e-itn-30-s-integrovanym-radiovym-vysilacem>.

8. DSTU EN 834:2017. Heat flow meters for determining the heat output of room heating batteries. Electrically powered devices (EN 834:2013, IDT). [Effective from 2017-01-08]. Kind. officer Kyiv: National standardization body of SE "UkrNDNC", 2017. 31 p.

9. Reuse projects. Access mode: <https://eefund.org.ua/druga-chastina-proektiv-povtornogo-vikoristannya-dlya-proektuvalnikiv>

10. Monitoring of participation projects in the "Energodim" program. Access mode: <https://sites.google.com/eefund.org.ua/monitoring/>

11. Goncharov N.S. Distribution of thermal energy consumption in an apartment building using distribution devices: mag. diss./ N.S. Goncharov; Ministry of Education and Science of Ukraine, NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky. – Kyiv, 2020. www.ela.kpi.ua.

12. DBN V.2.5-67:2013 Heating, ventilation and air conditioning. Kind. officer Kyiv: State Regulations of Ukraine, 2013. 240 p.

13. N. Lukic', N. Nikolic', S. Timotijevic', S. Tasic', Influence of an unheated apartment on the heating consumption of residential building considering current regulations—case of Serbia, *Energy Build.* 155 (2017) 16–24.

14. L. Canale, M. Dell'Isola, G. Ficco, T. Cholewa, S. Siggelsten, I. Balen. A comprehensive review on heat accounting and cost allocation in residential buildings in the EU. *Energy & Buildings* 202 (2019).

Надійшла: 21.09.2023

Received: 21.09.2023

В.І. Троханяк¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-8084-1568

О.В. Шеліманова¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-3321-1651

С.Є. Тарасенко¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-4829-0559

А.С. Баліцький¹, студент магістр, ORCID 0009-0005-0955-8849

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України

ДОСЛІДЖЕННЯ БІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ В ПТАШНИКУ ЗА ДОПОМОГОЮ CFD

Підтримка нормованого мікроклімату в пташнику це один із основних факторів. Саме від якісних показників параметрів повітря зрештою залежить якість виходу продукції. Птах при його утриманні потребує великих зусиль та технологічних рішень. У зв'язку з цим дослідження є удосконалення системи мікроклімату в повітряному середовищі пташника за рахунок включення витяжних вентиляторів на задній торцевій стінці нетрадиційним способом. Потужним інструментом прогнозування системи мікроклімату в пташнику є Computational Fluid Dynamics (CFD) за допомогою ANSYS Fluent як альтернатива експериментальним дослідженням.

За результатами CFD моделювання процесів гідродинаміки та тепломасообміну дійшли висновку, що зміни кута спойлера на 73° дозволяє подати повітря до центру пташника. При цьому перепад тиску припливних клапанів становить 70 Па, що дозволяє повною мірою забезпечити витяжний вентилятор. Швидкість повітря на вході клапанів припливу становить 11,54 м/с. Середня швидкість повітря на висоті 0,7 м від рівня підлоги становить 0,5 м/с, температура – 16,55 °С.

Таким чином, представлені наукові дослідження в майбутньому можна використовувати для розробки нових систем вентиляції пташників.

Ключові слова: пташник, бокова вентиляція, CFD, припливний клапан, аеродинаміка

Вступ

Розвиток нових технологій в енергетичній галузі, перехід на новий рівень енергозабезпечення об'єктів, у тому числі вентиляційних систем птахівничих комплексів, характеризується прискоренням темпів зростання всіх кількісних та якісних показників виходу продукції, а також удосконаленням усієї структури птахо виробництва.

Оцінка продуктивності нових вентиляційних систем може бути складним завданням, оскільки вона займає багато часу та досить дорога [1]. Як альтернатива польовим вимірюванням моделювання за допомогою обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics (CFD)) є потужним інструментом прогнозування повітряного потоку, концентрації частинок і газу, а також теплового середовища в тваринницьких приміщеннях [2-4]. Він також використовувався для оцінки ефективності існуючих систем вентиляції та нових конструкцій [5; 6].

У дослідженні [7] оцінювалися три моделі турбулентності k-ε: стандартна k-ε, RNG k-ε та realisable k-ε для оцінки внутрішнього середовища птиці на основі вимірювань температури та швидкості повітря. Ціль цього дослідження полягала в тому, щоб визначити, яка модель турбулентності найкраще відтворює експериментальні результати з використанням CFD. Вибір відповідної моделі турбулентності є важливим, оскільки це може значно вплинути на результати. У цьому дослідженні модель k-ε RNG найкраще узгоджувалась з вимірюваннями швидкості повітря та температури, тому її використання та типові параметри рекомендуються для моделювання внутрішнього середовища пташників.

У роботі [8] було оптимізовано конструкцію повітрязбірних пристроїв для цього типового бройлерного приміщення в холодному регіоні при поперечній вентиляції на основі двох факторів, що впливають: довжини пристрою напряму потоку та напряму потоку повітря. Оптимізовані пристрої подачі повітря допомогли покращити потік повітря в бройлерному приміщенні, тим самим змінивши фактори навколишнього середовища, такі як розподіл внутрішньої температури, розподіл швидкості повітря та розподіл вуглекислого газу. Довжина ідеального пристрою для напрямку потоку повинна бути приблизно 1 м і не більше 2 м.

Метою цієї роботи [9] є створення 3D-моделі з використанням CFD, здатної відтворити реальні умови експлуатації всередині пташника. Удосконалення полягає в інтеграції основних явних та прихованих джерел тепла відповідно до процедури, описаної в роботі [10], яка раніше застосовувалася до 2D моделі CFD. З метою дослідження типових процесів охолодження та обігріву, що спостерігаються в пташнику, були визначені та розглянуті для моделювання. Результати моделі спочатку були перевірені на основі експериментальних даних, щоб оцінити ефективність моделі для прогнозування градієнтів температури і вологості. Потім змодельоване поле швидкостей використовувалася розрахунку інтенсивності вентиляції.

З метою максимально використовувати переваги погодних умов авторами [11] у цьому дослідженні аналізується вплив природної вентиляції на динаміку внутрішнього клімату пташника з акцентом на роль зовнішніх кліматичних параметрів, крім напрямку вітру. За експериментальними даними з переважним північно-східним напрямом вітру було виділено сім періодів із стійким напрямом вітру не менше 4 годин. Три з цих періодів були обрані як типові приклади і використані для перевірки тривимірної моделі CFD для інтеграції основних елементів, внутрішній клімат: виділення тепла тваринами та водяної пари, радіаційна теплопередача та вентиляція. Потім були проаналізовані прогнози тривимірної моделі CFD з використанням концепції часу знаходження повітря для оцінки швидкості вентиляції, а також дослідження явного і прихованого теплообміну.

У дослідженні [12] авторами була розроблена модель 3D CFD для моделювання показників швидкості повітря, температури повітря, вологості та теплового стресу в комерційному пташнику-несучку. Модель була успішно підтверджена польовими вимірами у теплий, перехідний та холодний період року. За температурно-вологісним показником повітря що надходить у пташник при температурі 26,0 °C, 15,0 °C, 2,5°C інтенсивності вентиляції 85,8, 15,5 та 11,7 (повітрообміну на годину) влітку, осінню та взимку відповідно, тепловий стрес птиці був виявлений у 69,1%, 78,0% та 18,4%. Як продовження досліджень [13] автори розробили нову систему вентиляції, систему вентиляції з витісненням повітряного потоку вгору (ВППВ), яка дозволяє свіжому повітрю надходити в пташник через повітроводи, розташовані в нижній частині пташника, рухатися вгору за рахунок теплової плавучості, викликаной птицею різниці статичного тиску, викликаного витяжними вентиляторами, і зрештою виходять з приміщення через вентилятори, встановлені на даху. Результати показали, що система ВППВ призвела до підвищення ефективності повітрообміну в клітках на 46–129% та забезпечила більш однорідне теплове середовище на 9,4% меншим тепловим стресом влітку та на 68% меншим холодним стресом від холоду взимку порівняно з телевізійною системою.

У статті [14] наведено результати дослідження інтелектуальних систем управління біотехнологічними об'єктами на прикладі теплиці. Розроблено вимірювальну систему для ефективного дослідження сонячної радіації та прогнозування можливих порушень інформації. Нейронні мережі використовувалися як математичний інструмент прогнозування часових рядів температури. Надалі у роботі [15; 16] створено програмно-апаратну підсистему фітосмоніторингу в сучасній тепличній будівлі, яка забезпечується за допомогою програмного забезпечення LabVIEW та обладнання Arduino, яке тестується безпосередньо на виробництві. Для проведення експериментів автори роботи [17] розробили мобільний робот для моніторингу стану атмосфери та фітостану у захищених наземних об'єктах для формування стратегій контролю, що максимізують прибуток виробництва. Як завершальний етап авторами [18] розроблено енергоефективну систему управління електротехнологічним комплексом промислової теплиці. Оцінка якості рослинної продукції на основі використання функцій бажаності Харрінгтона. Це дозволяє визначати параметри мікроклімату (температуру рослин, температуру та вологість), максимізуючи прибуток продукції. Всі ці методи, які були задіяні для створення, аналізу та прогнозування мікроклімату в теплицях, можна великою мірою використовувати для пташників.

Авторами [19; 20] проведено дослідження модульного утримання птиці. Розроблено конструкцію модуля для вирощування птиці з інфрачервоним нагрівачем. Пропонована конструкція енергоефективна та рекомендується для встановлення у приміщеннях пташників. Проаналізовано мікроклімат у модулі. Температура повітря поблизу птиці у модулі становить 18,6 °C, а середня швидкість не перевищує 0,75 м/с.

Дана публікація є продовженням науково-практичних досліджень щодо удосконалення аеродинамічних характеристик повітряного середовища у пташнику [21, 22].

Мета і завдання.

Удосконалення системи мікроклімату в повітряному середовищі пташника за рахунок монтажу витяжних вентиляторів на бічній стінці загалом 8 шт. Як науковою складовою є дослідження процесів гідродинаміки та теплообміну в повітряному середовищі пташника з удосконаленням розташування як витяжного вентиляційного обладнання, так і спойлерів над припливними клапанами.

Матеріали та методи досліджень

Відповідно до мети роботи ми видозмінюємо розташування витяжних вентиляторів. Сутність заключається у наступному. У традиційній конструкції пташника витяжні вентилятори монтується не на задній торцевій стінці пташника, а в нашому випадку на бічній (рис. 1). по 4 шт на кожен стіну, в загальній кількості 8 шт.

На рис. 1 зображено 3D геометрію пташника для проведення моделювання CFD. Виконана у 100% масштабі, але лише половина пташника. По центру пташника встановлено граничні умови "симетрія". Інші граничні умови відображені на рис. 1. Ці заходи виконані через недостатню потужність комп'ютерного обладнання.

Розрахунки зроблено при витраті повітря 21,5 кг/с. Температура зовнішнього повітря приймається рівною +3 °C та вводиться параметр теплового випромінювання. Стіни виконані з двох сторін бетону

товщиною 60 мм та утепленим пінопластом (35 кг/м^3) між ними завтовшки 100 мм. Утеплена покрівля матеріалом "Izovat" $\gamma=30 \text{ кг/м}^3$, 100 мм. Підлога утеплена пінополістиролом 45 кг/м^3 товщиною 100 мм на ширину 2 м від стіни по периметру, решта – 50 мм. У птахівничих приміщеннях птиця при підлоговому утриманні є джерелом теплоти, що становить $+41 \text{ }^\circ\text{C}$. Система опалення не передбачена. Для видалення повітря використовують витяжні вентилятори типу Munters EM50 1,5 HP в загальній кількості 4 шт. Припливні клапани Wlotpowietrza 3000-VFG із загальною кількістю 80 шт, які розміщені на висоті 0,21 м від перекриття (1-8 клапани) та 0,81 м для 9-40 клапана. По довжині пташника розташовано 40 припливних клапанів. Над клапанами вбудовані спойлери під кутом нахилу від вертикалі 73° , довжина їх становить 0,2 м для 1-8 клапана та 0,25 м для 9-40 клапана. За рекомендацією попередніх робіт авторів [23], ближні два клапани біля вентилятора не застосовуються (див. рис. 1). Таким чином не задіяні 5-6, 15-16, 25-26 та 35-36 припливні клапани. Між цими клапанами встановлені витяжні вентилятори. Решта конструктивних параметрів припливної вентиляції пташника можна отримати з таблиці 1.

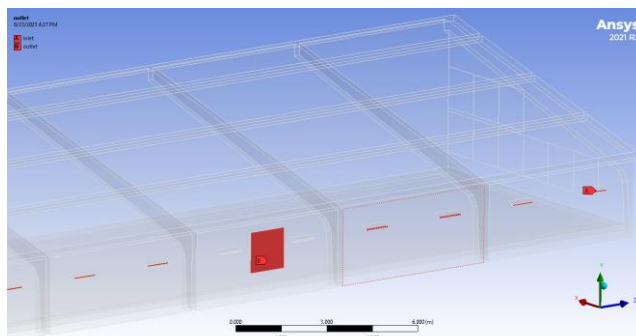


Рисунок 1 – Геометрія 3D пташника із зазначенням граничних умов та розташування четвертого витяжного вентилятора на бічній стінці

Таблиця 1 – Конструкційні параметри припливної вентиляції пташника

Параметри	Показник	
	1-8 кланани	9-40 клапани
Ширина клапана, м	0,86	0,86
Висота відкривання клапана, м	0,049	0,049
Довжина спойлера, м	0,2	0,25
Кут нахилу спойлера, $^\circ$	73	73
Висота розташування клапана від рівня перекриття, м	0,21	0,81
Довжина хвостовика клапана, м	0,04	0,04
Кількість задіяних клапанів для половини пташника, шт	6	26

Було побудовано сітка у повітряному середовищі пташника (див. рис. 2). В отворах витяжних вентиляторів та припливних клапанів сітка зменшена щодо решти площі стінки. А також поблизу підлоги, де знаходиться птиця. Подрібнення сітки проведено для точнішого розрахунку гідродинаміки та тепло-масообміну чисельним методом.

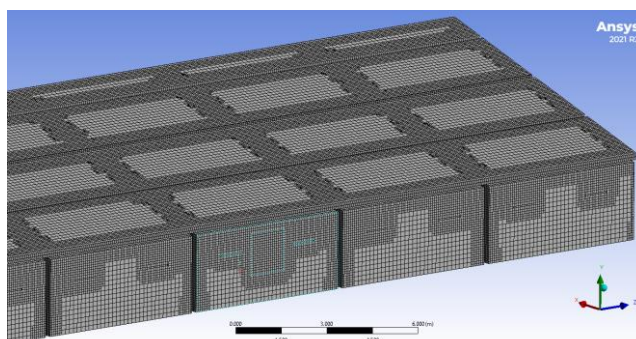


Рисунок 2 – Сітка в повітряному середовищі пташника

Використовуючи програмне забезпечення ANSYS Meshing, побудована розрахункова сітка 3D методом об'ємних елементів. Застосовано метод побудови сітки CutCell. Кількість елементів досягає 3 млн. Показник якості сітки ортогональної якості дорівнює 0,263. Мінімальний розмір елемента витяжних

вентиляторів та припливних клапанів на бічній стіні пташника 0,01 м. Більш детально можна ознайомитись у таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри будівництва сітки для птахівничого приміщення

Параметри настройки	Показник
Показчик якості сітки (orthogonal quality)	0,263
Кількість елементів, шт	3011614
Кількість вузлів, шт	2704435
Метод	CutCell
Максимальний розмір грані, м	0,16
Мінімальний розмір грані, м	0,08
Мінімальний розмір елемента припливних клапанів, м	0,08
Мінімальний розмір елемента витяжних вентиляторів, м	0,01

Модель CFD була виконана на рівняннях Navier-Stokes для конвективних течій [24-26]. У розрахунках застосовано модель випромінювання Discrete Ordinates [9; 27] і модель турбулентності Spalart-Allmaras [28; 29].

Результати досліджень

У цьому розділі наведено результати чисельного моделювання пташника в 3D за допомогою ANSYS Fluent. Це дозволяє оцінити гідродинамічні потоки повітря в пташнику. Для проведення чисельного моделювання попередньо здійснюють побудову сітки 3D методом об'ємних елементів ANSYS Meshing.

На Рисунках 2-5 показані результати чисельного моделювання пташника на трьох ділянках по довжині приміщення – 10,25 м, 44,75 м та 85,25 м. Перша ділянка – середина 4-го припливного клапана. Друга – 2-й витяжний вентилятор (між 15-м та 16-м припливними клапанами). Третя ділянка – на середині 29-го припливного клапана.

Постійна витрата повітря 60771,5 м³/год при температурі повітря на вході +3 °С. Верхні шари повітря біля перекриття та поблизу бічної стінки температура дещо вища. Це супроводжується за рахунок радіаційного випромінювання сонця і становить від +21,5 до +24,5 °С (рис. 3). Оскільки птиця є джерелом тепла, а також у сукупності з радіаційним випромінюванням, повітря в приміщенні частково нагрівається. У центрі приміщення по всій висоті температура досягає +15-16 °С. Прохолодне повітря з температурою +3 °С прямує в центр приміщення і омиває птицю. На ділянці де припливне повітря активно переміщується з повітрям, що знаходиться в пташнику, температура повітря не перевищує +10,92 °С. З результатів моделювання спостерігаємо, як витяжний вентилятор витягує частину тепла з птиці. Що є неприпустимо. Середня температура повітря на витяжних вентиляторах +17,745637 °С.

На вході на припливних клапанах тиск становить 70,027471 Па. На витяжних вентиляторах спостерігається певне розрідження -0,660793 Па. У певних точках максимальний тиск досягає 73,2143 Па.

На рис. 4-5 показана гідродинаміка потоку повітря в пташнику. Як згадувалося вище, потік повітря спрямований гору припливними клапанами. Однак за рахунок видовженого спойлера для клапанів 9-40 на 5 см, створення надмірних тисків у цій ділянці входу у припливний клапан, швидкість на вході повітря після проходження майже всієї ширини приміщення розподіляється вниз та вгору. Тільки клапани на висоті 210 мм від перекриття (рис. 4а, 5а) плавно прямує до центру пташника. Повітря частково затримується за рахунок бетонних виступів перекриття.

Середня швидкість повітря на вході в припливних клапанів – 11,539383 м/с. У певних точках припливних клапанів пташника максимальна швидкість може досягати 12,04231 м/с. У самому центрі по ширині приміщення пташника утворюється один великий вихор (Рис. 4а, 5а). За рахунок збурення поблизу витяжних вентиляторів, по довжині пташника на 44,75 м (рис. 4б, 5б), поблизу перекриття повітря частково затримується та прямує до вентиляторів. На ділянці витяжних вентиляторів середня швидкість 3,2578597 м/с (рис. 4б, 5б). На відстані від передньої торцевої стінки пташника на 85,25 м (рис. 4в, 5в) утворюються один великий вихор. Повітря, яке прокачується через припливні клапани на висоті 810 мм, не досягає центру приміщення. Пройшовши третину приміщення, повітря направляється вниз до птиці. Таким чином, більша частина птиці є під впливом надмірних швидкостей, які перевищують 2 м/с, що може спричинити їх захворювання. Це може бути спричинене збуренням, яке відбувається за рахунок великих обсягів приміщення. А також збільшення довжини спойлера на 5 см, в порівнянні із першими восьми (див. табл. 1). Враховуючи, що припливні клапани з 9 по 40 не мають можливості бути підняті на висоту 0,21 м від перекриття, через дорогосточі монтажні роботи з перенесенням цих клапанів на відповідну висоту. Автори пропонують збільшити довжину хвостовика з 0,04 м до 0,1 м, а також зменшення довжини спойлера до 0,2 м. Це дасть змогу відрегулювати потік повітря таким чином, щоб уникнути падіння повітря на птицю.

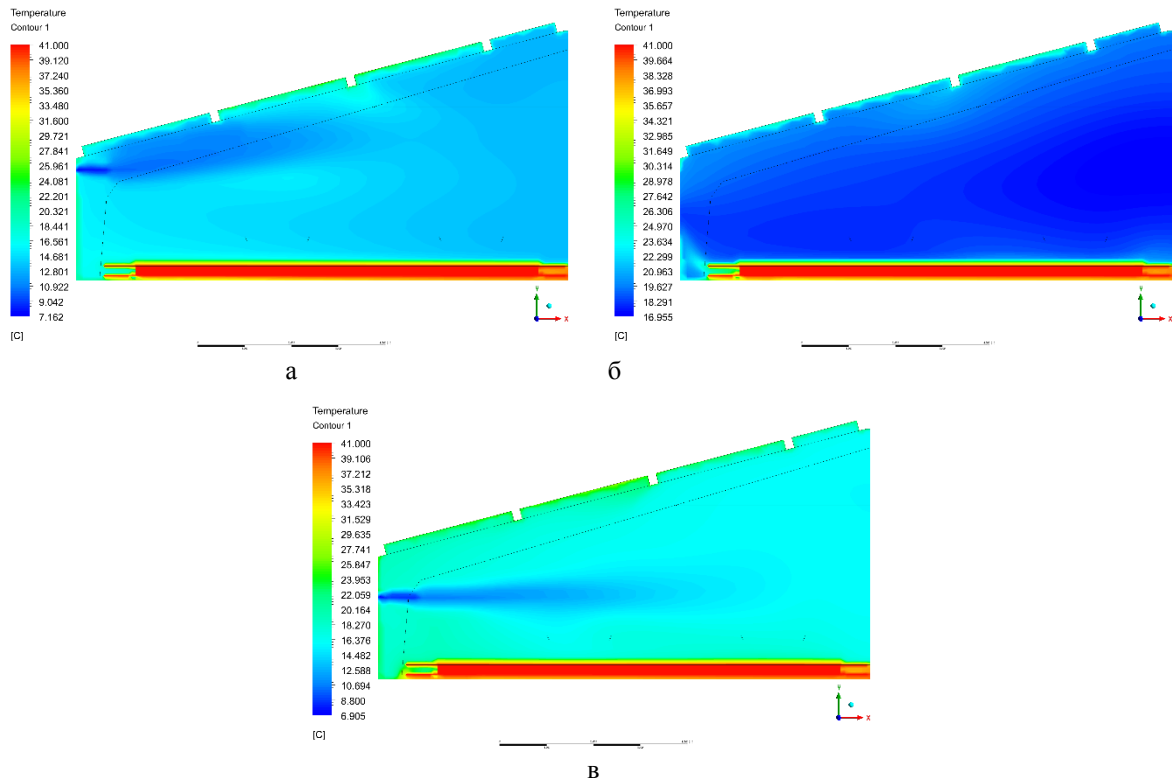


Рисунок 3 – Поле температур ($^{\circ}\text{C}$) у приміщенні пташника на відстані від передньої торцевої стінки на: а – 10,25 м; б – 44,75 м; в – 85,25 м.

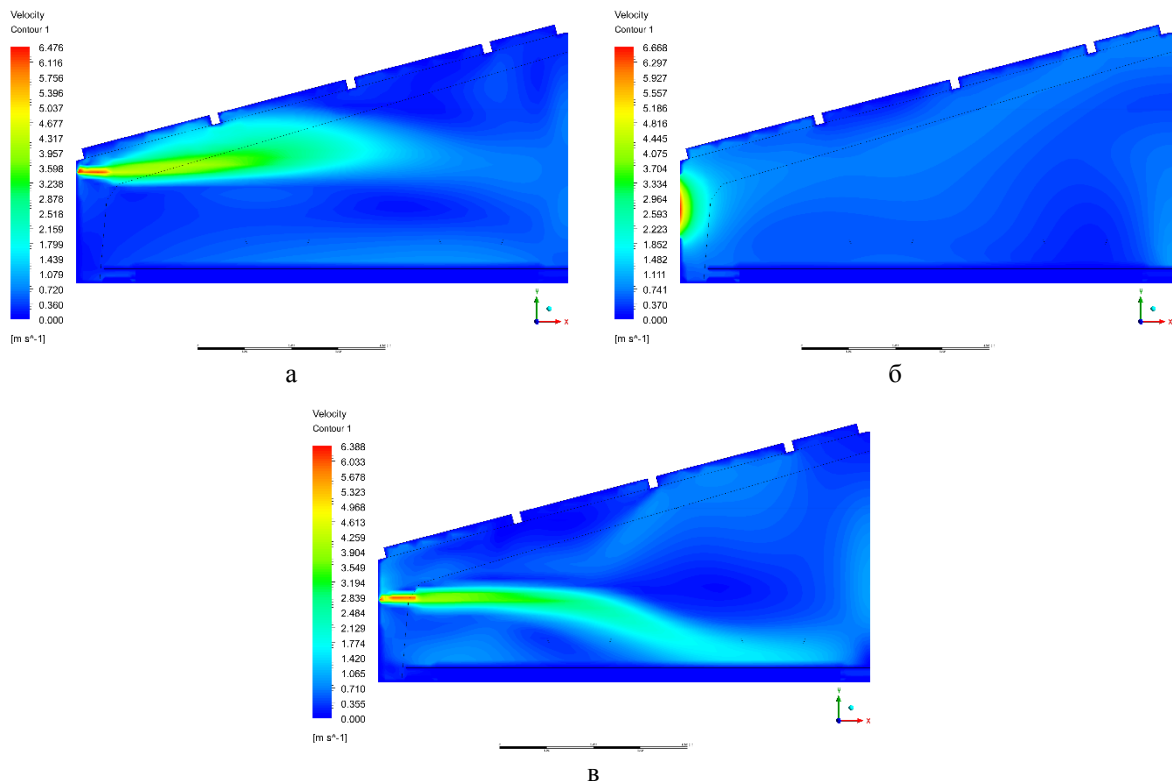


Рисунок 4 – Поле швидкостей (м/с) у приміщенні пташника на відстані від передньої торцевої стінки на:

a – 10,25 м; б – 44,75 м; в – 85,25 м.

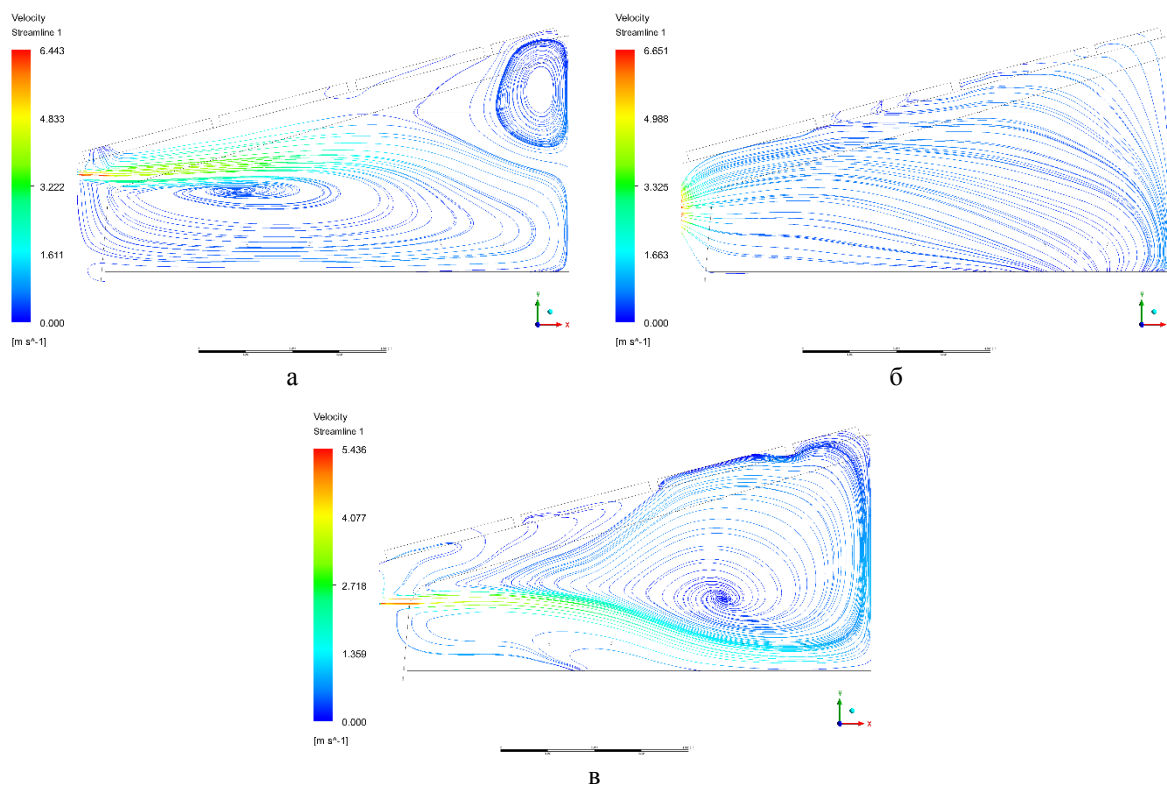


Рисунок 5 – Лінії току (м/с) у приміщенні пташника на відстані від передньої торцевої стінки на: *a – 10,25 м; б – 44,75 м; в – 85,25 м.*

На рис. 6 показано поле швидкостей та температур по площині приміщення на висоті 0,7 м. від рівня підлоги. Дані результати є найбільш цікавими, які допоможуть оцінити гідродинаміку та теплообмін повітря над птицею. Середня швидкість повітря становить 0,49924129 м/с, температура – 16,550689 °С. Лише у деяких точках швидкість дещо більше 2 м/с. Основний масив птиці не відчуватиме дискомфорту.

На рис. 7-8 представлено для пташника в 3D лінії току та візуалізація об'ємної витрати повітря в межах від 0 до 2 м/с. Наведені результати показують, що клапани розташовані на 0,81 м від перекриття працюють недостатньо ефективно. Клапани розташовані на 0,21 м, досягають своєї мети.

Детальна інформація усереднених показників повітряного середовища у пташнику в результаті проведеного чисельного моделювання представлена у таблиці 2.

З отриманих результатів CFD моделювання можна побачити, що за рахунок менших швидкостей над птицею і більш рівномірних температур якості продукції в порівнянні з традиційним розташуванням витяжних вентиляторів буде вищою. Проте представлені результати надають як позитивний, і негативний вплив на птицю загалом. Автори проаналізували всі позитивні та негативні моменти запропонованої системи вентиляції та надалі працюватимуть над усуненням недоліків.

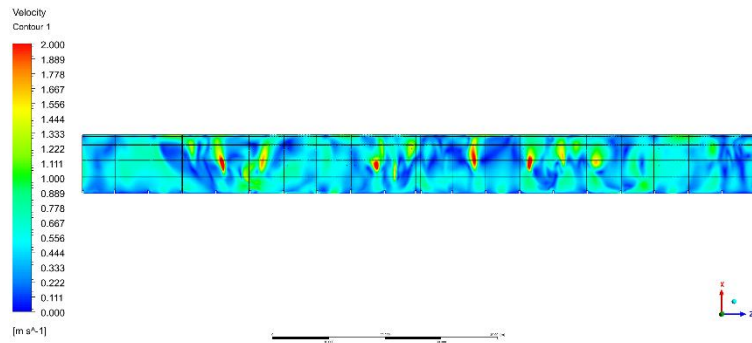
Подяка

Міністерству освіти та науки України за фінансову підтримку проєктів молодих вчених (Київ), № 110/1М-пр-2022.

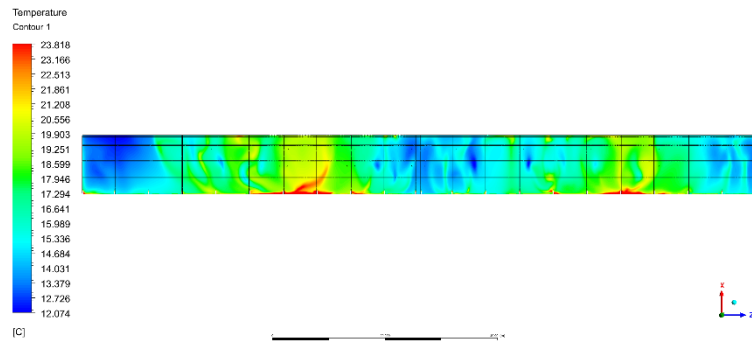
Висновки

Проведено CFD моделювання тепло-масообміну у приміщенні пташника. Для проведення CFD моделювання побудована сітка методом об'ємних елементів повітряного середовища пташника в 3D. Для побудови сітки у препроцесорі ANSYS Meshing використано метод CutCell. Максимальний розмір грані сітки 0,16 м. Кількість елементів близько 3 млн. показник якості сітки Orthogonal Quality 0,263.

Результати чисельного моделювання показали, що найбільш ефективно клапани працюють розташовані на висоті 0,21 м від перекриття. Швидкість повітря на вході припливних клапанів 11,54 м/с. Середня швидкість повітря на висоті 0,7 м від рівня підлоги становить 0,5 м/с, а температура – 16,55 °С. Зважаючи на вибір вентилятора, перепад тиску у припливних клапанів становить 70 Па, що повністю забезпечується прокачуванням повітря. Кут нахилу клапана щодо стіни становить 73°. Відкриття клапана на 49 мм. Однак із запропонованим розташуванням витяжних вентиляторів на бічній стінці пташника система вентиляції працює досить ефективно.

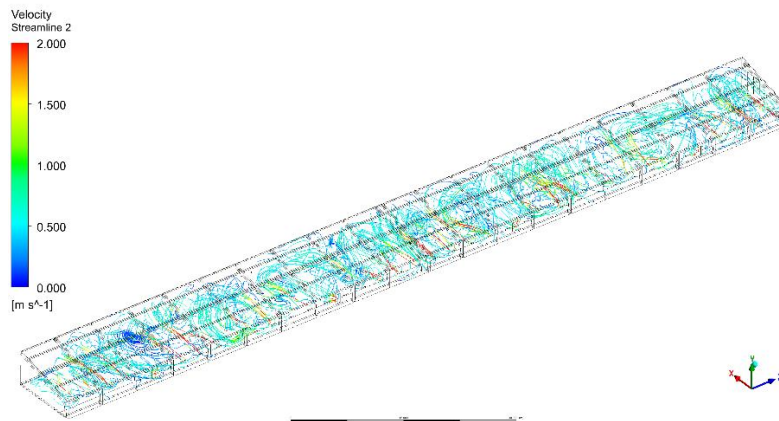


а

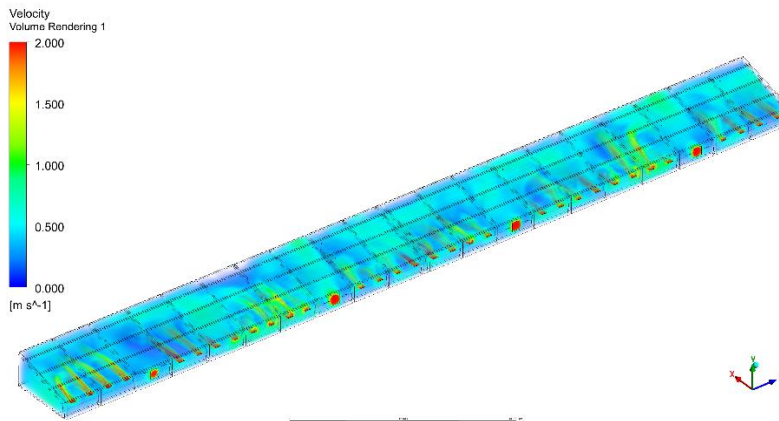


б

Рисунок 6 – Поле швидкостей, м/с (а) і поле температур, °С (б) у приміщенні пташника на висоті 0,7 м від рівня підлоги



а



б

Рисунок 8 – Візуалізація об'ємної витрати повітря пташника в межах від 0 до 2 м/с

Таблиця 2 – Середні показники повітряного середовища у пташнику

Параметр	Припливні клапани (inlet)	Витяжні вентилятори (outlet)
Витрата повітря на вході для половини пташника, кг/с	21,5	21,50118
Витрата повітря на вході для половини пташника, м ³ /год	60771,5	60771,5
Витрата повітря на вході для повного пташника, м ³ /год	121543	121543
Тиск повітря, Па	70,027471	-0,66079316
Температура повітря, °C	4,0107573	17,745637
Швидкість повітря, м/с	11,539383	3,2578597

Отримані в роботі наукові результати можуть використовуватися при розробці нових систем вентиляції для підтримки нормованого мікроклімату в приміщеннях птахівництва, що дозволяє збільшення продуктивності птахофабрик.

Список використаної літератури

1. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 1: Ammonia release modelling / B. Vjerg та ін. *Biosystems Engineering*. 2013. Т. 116, № 5. Р. 232–245.
2. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm / E. Bustamante та ін. *Energies*. 2013. Т. 6, № 5. С. 2605-2623.
3. Computational fluid dynamics analysis of the thermal distribution of animal occupied zones using the jet-drop-distance concept in a mechanically ventilated broiler house / K.S. Kwon та ін. *Biosystems Engineering*. 2015. Т. 136. С. 51-68.
4. Wang K., Wang X., Wu B. Assessment of hygrothermal conditions in a farrowing room with a wet-pad cooling system based on CFD simulation and field measurements. *Transactions of the ASABE*. 2014. Т. 57, № 5. С. 1493-1500.
5. Online design aid for evaluating manure pit ventilation systems to reduce entry risk / H.B. Manbeck та ін. *Frontiers in Public Health*. 2016. Т. 4, № 2. С. 1-16.
6. Assessing the ventilation performance of a naturally ventilated livestock building with different eave opening conditions / T. Norton та ін. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Т. 71, № 1. С. 7-21.
7. Küçüktopcu E., Cemek, B. Evaluating the influence of turbulence models used in computational fluid dynamics for the prediction of airflows inside poultry houses. *Biosystems Engineering*. 2019. Т. 183. С. 1-12.
8. Ma Y.X., Zou H.F. Optimized design of air inlet devices based on environmental analysis of a broiler house model. *IOP Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 789. 012036.
9. ANSYS Fluent theory guide. Release 2021 R1., 2021. URL: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v211/en/pdf/ANSYS_Fluent_Theory_Guide.pdf (дата звернення: 04.09.2023).
10. Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics / F. Rojano та ін. *Biosystems Engineering*. 2015. Т. 136. С. 25-38.
11. Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house / F. Rojano та ін. *Biosystems Engineering*. 2016. Т. 151. С. 273-285.
12. Tong X., Hong S.-W., Zhao, L. CFD modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation. *Biosystems Engineering*. 2019. Т. 178. С. 275-293.
13. Tong X., Hong S.-W., Zhao, L. Using CFD simulations to develop an upward airflow displacement ventilation system for manure-belt layer houses to improve the indoor environment. *Biosystems Engineering*. 2019. Т. 178. С. 294-308.
14. Intelligent control system of biotechnological objects with fuzzy controller and noise filtration unit / A. Dudnyk та ін. *2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology* 2019. Т. 3. С. 586-590.
15. Lendiel T., Lysenko V., Nakonechna K. Computer-integrated technologies for fitomonitoring in the greenhouse. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2021. Т. 48. С. 711-729.
16. Phytomonitoring in the phytometrics of the plants / V. Lysenko та ін. *E3S Web of Conferences*. 2020. Т. 154. 07012.
17. Mobile robot with optical sensors for remote assessment of plant conditions and atmospheric parameters in an industrial greenhouse / V. Lysenko та ін. *International Society for Optical Engineering*. 2021. Т. 12040. 120400D.
18. Lysenko V., Bolbot I., Lendel T. Energy efficient system of electrotechnological complex control in industrial greenhouse. *Technical Electrodynamics*. 2019. Т. 2, № 2. С. 78-81.
19. Spodyniuk N., Lis A. Research of temperature regime in the module for poultry growing. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Т. 100. С. 451-458.
20. Experimental research and CFD modeling of modular poultry breeding / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2021. Т. 65, № 3. С. 303-311.
21. Using CFD simulation to investigate the impact of fresh air valves on poultry house aerodynamics in case of a side ventilation system / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020. Т. 62, № 3. С. 155-164.

22. Investigation of the influence of exhaust fan's location on the upper line on poultry house aerodynamics with the use of CFD / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2022. Т. 67, № 2. С. 425-432.
23. Investigation of an improved side ventilation system in a poultry house using CFD / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2023. Т. 69, № 1. С. 384-393.
24. Khmelnik S. Navier-Stokes equations. On the existence and the search method for global solutions. Bene-Ayish : "MiC" - Mathematics in Computer Corp, 2018. 261 с.
25. Trokhaniak V., Klendii O. Numerical simulation of hydrodynamic and heat-mass exchange processes of a microclimate control system in an industrial greenhouse. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2018. Т. 11(60), № 2. С. 171-184.
26. A comparative numerical study of shell and multi-tube heat exchanger performance with different baffles configurations / S.A. Marzouk та ін. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. Т. 179. 107655.
27. Moreno J., Casado C., Marugán J. Improved discrete ordinate method for accurate simulation radiation transport using solar and LED light sources. *Chemical Engineering Science*. 2019. Т. 205. С. 151-164.
28. Allmaras S., Johnson F., Spalart P. Modifications and clarifications for the implementation of the Spalart-Allmaras Turbulence model. м. Melbourne, 9-12 лип. 2012 р. Melbourne, 2012. С. 9-13.
29. Simulation of airflow past a 2D NACA0015 airfoil using an isogeometric incompressible Navier-Stokes solver with the Spalart-Allmaras turbulence model / K. Nordanger та ін. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. Т. 290. С. 183-208.

V. Trokhaniak¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8084-1568
O. Shelimanova¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-3321-1651
S. Tarasenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4829-0559
A. Balitsky¹, master student, ORCID 0009-0005-0955-8849
¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

RESEARCH OF THE SIDE VENTILATION SYSTEM IN THE POULTRY HOUSE USING CFD

Maintaining a standardized microclimate in the poultry house is one of the main factors. The quality of the output ultimately depends on the quality indicators of the air parameters. Keeping a bird requires great efforts and technological solutions. In connection with this study, there is an improvement of the microclimate system in the air environment of the poultry house due to the inclusion of exhaust fans on the rear end wall in an unconventional way. Computational Fluid Dynamics (CFD) using ANSYS Fluent is a powerful tool for predicting the microclimate system in the poultry house as an alternative to experimental studies. The CFD model was performed on the Navier-Stokes equations for convective flows. The calculations use the Discrete Ordinates radiation model and the Spalart-Allmaras turbulence model.

The calculations were made with an air consumption of 21.5 kg/s. The temperature of the outside air is assumed equal to +3 °C and the thermal radiation parameter is entered. For air removal, Munters EM50 1.5 HP exhaust fans are used in a total number of 4 pcs. Inflow valves Wlotpowietrza 3000-VFG with a total number of 80 pcs., which are placed at a height of 0.21 m from the ceiling (1-8 valves) and 0.81 m for 9-40 valves.

According to the results of CFD modeling of hydrodynamics and heat and mass exchange processes, it was concluded that changing the angle of the spoiler by 73° allows air to be supplied to the center of the poultry house. The upper air layers near the ceiling and near the side wall have a slightly higher temperature. This is accompanied by radiation from the sun and ranges from +21.5 to +24.5 °C. Since the bird is a source of heat, and in combination with radiation, the air in the room is partially heated. In the center of the room along the entire height, the temperature reaches +15-16 °C. At the same time, the pressure drop of the inlet valves is 70 Pa, which allows the exhaust fan to be fully supplied. The air velocity at the inlet of the inflow valves is 11.54 m/s. The average air speed at a height of 0.7 m from the floor level is 0.5 m/s, the temperature is 16.55 °C.

Thus, the presented scientific research can be used in the future to develop new ventilation systems for poultry houses.

Keywords: aviary, side ventilation, CFD, inlet valve, aerodynamics

References

1. Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 1: Ammonia release modelling / B. Bjerg та ін. *Biosystems Engineering*. 2013. Vol. 116, no. 5. P. 232-245.
2. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm / E. Bustamante та ін. *Energies*. 2013. Vol. 6, no. 5. P. 2605-2623.
3. Computational fluid dynamics analysis of the thermal distribution of animal occupied zones using the jet-drop-distance concept in a mechanically ventilated broiler house / K.S. Kwon та ін. *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 136. P. 51-68.

4. Wang K., Wang X., Wu B. Assessment of hygrothermal conditions in a farrowing room with a wet-pad cooling system based on CFD simulation and field measurements. *Transactions of the ASABE*. 2014. Vol. 57, no. 5. P. 1493-1500.
5. Online design aid for evaluating manure pit ventilation systems to reduce entry risk / H.B. Manbeck та ін. *Frontiers in Public Health*. 2016. Vol. 4, no. 2. P. 1-16.
6. Assessing the ventilation performance of a naturally ventilated livestock building with different eave opening conditions / T. Norton та ін. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Vol. 71, no. 1. P. 7-21.
7. Küçüktopcu E., Cemek, B. Evaluating the influence of turbulence models used in computational fluid dynamics for the prediction of airflows inside poultry houses. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 183. P. 1-12.
8. Ma Y.X., Zou H.F. Optimized design of air inlet devices based on environmental analysis of a broiler house model. *IOP Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 789. 012036.
9. ANSYS Fluent theory guide. Release 2021 R1., 2021. URL: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v211/en/pdf/ANSYS_Fluent_Theory_Guide.pdf (date of access: 04.09.2023).
10. Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics / F. Rojano та ін. *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 136. P. 25-38.
11. Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house / F. Rojano та ін. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 151. P. 273-285.
12. Tong X., Hong S.-W., Zhao, L. CFD modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. P. 275-293.
13. Tong X., Hong S.-W., Zhao, L. Using CFD simulations to develop an upward airflow displacement ventilation system for manure-belt layer houses to improve the indoor environment. *Biosystems Engineering*. 2019. Vol. 178. P. 294-308.
14. Intelligent control system of biotechnological objects with fuzzy controller and noise filtration unit / A. Dudnyk та ін. *2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology* 2019. Vol. 3. P. 586-590.
15. Lendiel T., Lysenko V., Nakonechna K. Computer-integrated technologies for fitomonitoring in the greenhouse. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2021. Vol. 48. C. 711-729.
16. Phytomonitoring in the phytometrics of the plants / V. Lysenko та ін. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 154. 07012.
17. Mobile robot with optical sensors for remote assessment of plant conditions and atmospheric parameters in an industrial greenhouse / V. Lysenko та ін. *International Society for Optical Engineering*. 2021. Vol. 12040. 120400D.
18. Lysenko V., Bolbot I., Lendel T. Energy efficient system of electrotechnological complex control in industrial greenhouse. *Technical Electrodynamics*. 2019. Vol. 2, no. 2. P. 78-81.
19. Spodyniuk N., Lis A. Research of temperature regime in the module for poultry growing. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. P. 451-458.
20. Experimental research and CFD modeling of modular poultry breeding / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 65, no. 3. P. 303-311.
21. Using CFD simulation to investigate the impact of fresh air valves on poultry house aerodynamics in case of a side ventilation system / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 62, no. 3. P. 155-164.
22. Investigation of the influence of exhaust fan's location on the upper line on poultry house aerodynamics with the use of CFD / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 67, no. 2. P. 425-432.
23. Investigation of an improved side ventilation system in a poultry house using CFD / V.I. Trokhaniak та ін. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 69, no. 1. P. 384-393.
24. Khmelnik S. Navier-Stokes equations. On the existence and the search method for global solutions. Bene-Ayish : "MiC" - Mathematics in Computer Corp, 2018. 261 p.
25. Trokhaniak V., Klendii O. Numerical simulation of hydrodynamic and heat-mass exchange processes of a microclimate control system in an industrial greenhouse. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2018. Vol. 11(60), no 2. P. 171-184.
26. A comparative numerical study of shell and multi-tube heat exchanger performance with different baffles configurations / S.A. Marzouk та ін. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020. Vol. 179. 107655.
27. Moreno J., Casado C., Marugán J. Improved discrete ordinate method for accurate simulation radiation transport using solar and LED light sources. *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 205. P. 151-164.
28. Allmaras S., Johnson F., Spalart P. Modifications and clarifications for the implementation of the Spalart-Allmaras Turbulence model. Melbourne, 9-12 July. 2012. Melbourne, 2012. P. 9-13.
29. Simulation of airflow past a 2D NACA0015 airfoil using an isogeometric incompressible Navier-Stokes solver with the Spalart-Allmaras turbulence model / K. Nordanger та ін. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. Vol. 290. P. 183-208.

Надійшла: 04.09.2023
Received: 04.09.2023

ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДНОГО ПОВІТРООБМІНУ В БАГАТОКВАРТИРНИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

Більшість багатоквартирних житлових будинків, побудованих у ХХ столітті в Центральній та Східній Європі, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Метою даного дослідження є параметричний аналіз впливових факторів на кратність повітрообміну в приміщенні та експериментальне дослідження концентрації CO₂ у типовій квартирі. Об'єктом дослідження є однокімнатна квартира в гуртожитку сімейного типу в м. Київ. У гуртожитку функціонує канална природна вентиляція. В роботі проводились експериментальні заміри концентрації вуглекислого газу в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі в літній період. Для вимірювання швидкості повітрообміну використовувався метод індикаторного газу. При інфільтрації повітря середня кратність повітрообміну у приміщенні житлової кімнати становила 2,41 год⁻¹, у коридорі – 2,34 год⁻¹, на кухні – 0,57 год⁻¹. При умовах ексфільтрації середні значення були нижчими: житлова кімната – 0,24 год⁻¹, коридор – 0,94 год⁻¹, кухня – 0,52 год⁻¹. Тобто масовий баланс CO₂, з врахуванням кількості мешканців, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі.

Ключові слова: повітрообмін, природна вентиляція, концентрація вуглекислого газу, масоперенос, параметричний аналіз, умови мікроклімату

Вступ

Велика частка первинної енергії в Європі споживається будівлями. При цьому більшість багатоквартирних житлових будинків, побудованих у ХХ столітті в Центральній та Східній Європі, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Значна кількість енергозберігаючих заходів, що реалізується, стосується покращення теплофізичних властивостей огорожень та модернізації систем опалення. Частка витрат з вентиляційним повітрям є найбільшою, за умов дотримання вимог щодо повітрообміну. Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні [1]. Зменшення цієї складової є другим кроком у впровадженні енергозберігаючих заходів.

Вентиляційна система повинна забезпечувати подачу свіжого повітря і видалення забрудненого повітря з приміщень. У наш час люди проводять у приміщенні більше 80% (навіть 90% в промислових країнах) свого часу.

Якість повітря в приміщенні має значний вплив на комфорт людини, здоров'я та працездатність мешканців. В дослідженні [2] була проведена оцінка впливу простої енергетичної реновації на якість повітря в приміщенні, швидкість повітрообміну і задоволеність мешканців у словацьких житлових будинках. Було обстежено три пари однакових багатоквартирних житлових будинків з природною вентиляцією. Одна будівля в кожній парі була щойно відремонтована, інша була в первісному стані. Мешканці заповнили анкету щодо сприйнятої якості повітря, симптомів синдрому хворого будинку та звичок провітрювання. У відремонтованих будівлях концентрації CO₂ були значно вищими, а кратність повітрообміну – нижчими. В загальному, енергетична реконструкція призвела до зниження рівня задоволеності мешканців якістю повітря в приміщеннях. Інші результати досліджень [3], проведених в аудиторіях деяких університетів, підтверджують тісний зв'язок між кратністю повітрообміну та успішністю навчання студентів.

У більшості існуючих будівель України не передбачена або не працює механічна вентиляція. Тому надходження свіжого повітря відбувається шляхом інфільтрації через повітряні канали вентиляційної системи, провітрювання та нещільності чи інші отвори огорожувальних конструкцій будівлі. Але після заміни старих вікон на герметичні металопластикові відбувається порушення повітряного режиму приміщень квартир, оскільки за відсутності механічної припливно-витяжної системи вентиляції інфільтрація зовнішнього повітря є єдиним джерелом надходження свіжого зовнішнього повітря. ASHRAE визначає інфільтрацію повітря як неконтрольований витік зовнішнього повітря всередину будівлі, спричинений наявністю перепаду тиску між різними елементами огороження будівлі [4].

Хоча вплив ненавмисної інфільтрації на використання енергії будівлею може бути значним, поточні методи моделювання енергії та методи проектування, як правило, не в змозі точно врахувати інфільтрацію оболонки та вплив покращеної герметичності. Огляд можливостей аналізу повітряного потоку виявив, що багато емпіричних моделей інфільтрації, які використовуються базуються на методах розрахунку, розроблених для малоповерхових житлових будинків відповідно до стандарту ASHRAE 62.2 "Вентиляція та допустима якість повітря в малоповерхових житлових будинках" [5]. Стандарти ASHRAE 62.1 і 62.2 є визнаними стандартами для проектування систем вентиляції та прийнятної якості повітря в приміщенні. Розширені та переглянуті у 2022 році обидва стандарти визначають мінімальну швидкість вентиляції та інші заходи з метою мінімізації негативного впливу на здоров'я мешканців.

Згідно з Європейськими нормативами, які були переглянуті у 2018 та 2019 роках ((Directive 2010/31/EU та Directive 2012/27/EU), у країнах Євросоюзу повинні діяти національні вимоги щодо енергоефективності [1]. В Україні запроваджено стандарт EN-15251 як національний. Тому рекомендовані значення витрат вентиляції збігаються з наведеними в EN 16798. В стандарті CEN EN 16798 наведені рекомендації щодо визначення мінімальної витрати повітря, вираженої в л/с на м², л/с на людину або швидкості повітрообміну за годину для різних приміщень. Проте в різних країнах вимоги до вентиляції в житлових будинках відрізняються.

Наприклад в Кореї з 2006 року стала обов'язковою установка вентиляційного пристрою в житлових будинках, що мала забезпечувати кратність повітрообміну в житлі на рівні 0,7 год⁻¹. Однак у 2013 році уряд Кореї змінив мінімальну швидкість повітряного потоку до 0,5 год⁻¹, щоб зменшити споживання енергії.

Наразі більшість стандартів не передбачають конкретного підходу до визначення мінімального повітрообміну, а лише рекомендують ту чи іншу стратегію розрахунку. Тому, спеціалісти, опираючись на національні стандарти, приймають власні рішення щодо методу визначення нормативного повітрообміну.

Державні будівельні норми України для житлових будинків (ДБН В 2.2.-15:2019) передбачають вимоги до вентиляції у вигляді мінімального повітрообміну приміщень різного призначення (вітальня, спальня, кабінет, кухня, санвузол). Цей стандарт застосовується при розробці проектів, реконструкції та капітальному ремонті. При оцінці енергетичної ефективності будівель, часто приймають значення постійної кратності повітрообміну для будівлі в цілому. В Україні кратність повітрообміну в житлових будівлях з природною вентиляцією приймають згідно з ДСТУ 9091:2022 "Енергетична ефективність будівель". У розрахунках енергетичного сертифіката будівель ця величина враховується як інфільтраційна. Національні стандарти також враховують можливість визначення кратності повітрообміну всередині будівлі шляхом проведення випробувань.

Визначення кратності повітрообміну, з врахуванням впливових факторів для умов експлуатації є складним завданням. Емпіричні методи визначення швидкості повітрообміну, опираються на стандарти ASHRAE і BLAST. Вони враховують три механізми впливу: ефект стека, вітровий ефект та механічну вентиляцію. Ефект вітру є найбільш складним та залежить від таких факторів, як висота будівлі, її спрямованість, швидкість та напрямок вітру та іншого [6]. Для більш ефективного повітряного потоку та забезпечення необхідної якості повітря в приміщеннях використовують чисельне моделювання для моделювання розподілу повітря за допомогою програмного забезпечення: eQuest, EnergyPlus, TRNSYS, CONTAM, DOE2, DesignBuilder.

В свою чергу експериментальні вимірювання швидкості інфільтрації все ще є актуальними через можливість отримання фактичних даних у реальному часі. Експериментально кратність повітрообміну можна визначити за допомогою методів індикаторного газу. Індикаторний газ — це речовина, яка використовується для позначення об'ємів повітря, щоб можна було зробити висновок про їх масовий рух. Ідеальний газ-індикатор має бути безпечним (нетоксичним, не алергенним, незаймистим), неактивним (він не повинен вступати в хімічну чи фізичну реакцію з навколишнім середовищем) і легко вимірюваним (бажано, щоб його можна було вимірювати за допомогою недорогих приладів, які повинні мати можливість вимірювати низькі концентрації). Крім того, індикаторний газ повинен ідеально змішуватися з повітрям (подібної щільності) і його можна відрізнити від компонентів повітря.

Для вимірювання швидкості повітрообміну можна використовувати кілька методів індикаторного газу:

1. Спад концентрації : доза індикаторного газу впорскується та змішується з повітрям у кімнаті. Закачування припиняється і концентрація індикаторного газу стає рівномірною, починається зниження концентрації індикаторного газу, яке реєструється протягом заданого періоду.

2. Постійне впорскування : Індикаторний газ безперервно виділяється в приміщення з постійною швидкістю потоку протягом усього періоду вимірювання.

3. Постійна концентрація : впорскування індикаторного газу контролюється, щоб підтримувати постійну концентрацію у вентиляційному приміщенні.

Серед трьох методів спад концентрації є найбільш прийнятним, оскільки його реалізація найлегша. Крім того, необхідна кількість індикаторного газу для цього методу вимірювання нижча, ніж для інших

методів. Процедура зменшення концентрації полягає у впорскуванні невеликої кількості індикаторного газу в простір, при цьому слідкуючи за тим, щоб початкові концентрації газу були рівномірними по всій будівлі. Потім відстежується спад концентрації індикаторного газу. Концентрація газу зменшується, коли свіже повітря з нижчою або нульовою концентрацією газу змішується з повітрям у приміщенні. Потік вхідного повітря, таким чином, можна розрахувати за допомогою масового балансу в системі. Газу, які зазвичай використовуються як індикатори в процедурі розпаду, включають гексафторид сірки (SF_6) [7], [8] і вуглекислий газ (CO_2) [9]. Перфторвуглецеві сполуки також є поширеними індикаторами, які використовуються для вимірювання кратності повітрообміну, але в рамках методу розшифрувати PFT (Perfluorocarbon Tracer gas - перфторвуглець в якості індикаторного газу) [10]. Однак використання SF_6 або PFT як індикатора збільшує складність і витрати на процедуру, оскільки для виконання вимірювань та аналізу потрібні досвідчені оператори та спеціальне обладнання (наприклад, газовий хроматограф), також в них складно врахувати динамічну зміну зовнішніх та внутрішніх умов. Вимірювання методом PFT можуть тривати кілька днів або тижнів і не заважають мешканцям. Однак вчені [11] провели аналіз помилок методу PFT і виявили, що за ідеальних обставин загальна невизначеність становить 10–15%. Навіть у контрольованих експериментах, проведених професіоналами, невизначеність сягає 20%.

Гексафторид сірки (SF_6) був широко використовуваним газом [12], але він є потужним парниковим газом. Завдяки цьому вуглекислий газ (CO_2) став популярним вибором. CO_2 є нетоксичним індикаторним газом, який зазвичай використовується як важливий параметр у приміщенні, з фоновою концентрацією приблизно 420 частин на мільйон. Використання CO_2 не є обмеженням, оскільки він не вибухонебезпечний і нетоксичний при низьких концентраціях. Концентрація CO_2 на відкритому повітрі може змінюватися, але цю фонову концентрацію можна виміряти та компенсувати в розрахунку швидкості зміни повітря.

У дослідженні [13] було визначено швидкість вентиляції на основі регулярних вимірювань повітря в приміщенні. Використаний метод складався з триетапного процесу, який базується на аналітичному розв'язанні рівняння балансу маси для концентрацій ключових забруднюючих речовин, таких як CO_2 . Було виявлено, що результати моделі для концентрацій у приміщенні узгоджуються з експериментальними виміряними значеннями.

Більшість цитованих досліджень використовували методи пасивного індикаторного газу (виділення від людей) для оцінки інтенсивності вентиляції в будівлях. У дослідженні [14] було виявлено, що ця методика занижує середню вентиляцію на 30%. Масовий баланс CO_2 , створюваного мешканцями, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі. В роботі [15] було виявлено досить хорошу відповідність між показниками обміну повітря, розрахованими на основі CO_2 концентрації та швидкості зміни повітря, виміряні методом спаду або постійної концентрації з використанням фреону як індикаторного газу. Різниця між результатами, отриманими цими методами, була меншою ніж 10%. Техніка пасивного індикаторного газу показала результати, які значно відрізнялися від інших методик. Різниця коливалася від 20% до 120%.

Вуглекислий газ є одним з головних забруднювачів повітря в житлових приміщеннях. Він виділяється при диханні людей, використанні побутової техніки, спаленні палива та інших джерел. У таблиці 1 наведена залежність самопочуття від концентрації газу в повітрі приміщення [16].

Таблиця 1 – Вплив вуглекислого газу на людину

Рівень CO_2		Фізіологічні прояви
ppm	г/м ³	
380 - 400	0,68 - 0,72	Атмосферне повітря – ідеальне для здоров'я і гарного самопочуття
400 - 600	0,72 - 1,08	Нормальний рівень для приміщення. Рекомендовано не перевищувати для дитячих садків, шкільних приміщень та інших навчальних закладів
600 - 800	1,08 - 1,44	З'являються скарги на якість повітря. У людей з астматичними проблемами частішають напади
800- 1000	1,44 - 1,80	Кожен другий відчуває млявість, духоту та головний біль. Може призвести до негативних змін крові, можуть з'явитися проблеми з кровоносною та дихальною системою
1000 - 1400	1,80 - 2,52	Млявість, проблеми з уважністю і обробкою інформації, проблеми з носоглоткою, тяжке дихання
1400 - 2000	2,52 - 3,60	Сильна втома, нездатність зосередитися, безініціативність, проблеми зі сном, сухість слизових оболонок
2000 <	3,60 <	Кількість помилок в роботі сильно зростає, 70 % співробітників не можуть зосередитися на роботі

За результатами досліджень [17] слідує, мешканці кімнати з підвищеним рівнем концентрації вуглекислого газу докладають більше зусиль для дихання, їхні серця б'ються швидше, а рівень оксигенації клітин знижується. В результаті з'являються ознаки ранньої втоми і відсутність концентрації на робочому місці, що в кінцевому підсумку призводить до низької професійної ефективності і низької продуктивності праці. В іншій праці [18] було доведено, що під час перебування однієї людини в кімнаті з новим металопластиковим вікном відбулося підвищення концентрації вуглекислого газу на 33 % вище, ніж у випадку, коли в кімнаті встановлено старе дерев'яне подвійне вікно. Коли людина виходила з приміщення, концентрація вуглекислого газу починала знижуватися. В кімнаті де були встановлені нові пластикові вікна, зниження концентрації вуглекислого газу було приблизно на 27% менше в порожній кімнаті, ніж у порожній кімнаті зі старим дерев'яним вікном.

Дослідження інфільтрації повітря в будівлях є актуальними, оскільки вони допомагають вивчити вплив кратності повітрообміну на здоров'я людини та енерговитрати будівель. Адже з однієї сторони, забезпечення вимог кратності повітрообміну приміщень є необхідними для підтримання умов мікроклімату, а з іншого боку, надмірна вентиляція впливає на споживання енергії будівлями особливо під час сезону опалення та охолодження.

Мета та завдання

Метою роботи є параметричний аналіз впливових факторів на кратність повітрообміну в приміщенні та експериментальне дослідження концентрації CO₂ у типовій квартирі.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні *завдання*:

- 1) аналіз впливових параметрів на повітрообмін в приміщеннях;
- 2) проведення експериментального дослідження концентрації CO₂ у приміщеннях типової квартири в літній період;
- 3) визначення фактичного повітрообміну на основі масових балансів;
- 4) порівняння отриманих фактичних значень кратності повітрообміну із нормативними значеннями із діючих стандартів.

Матеріал і результати досліджень

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження обрано існуючу однокімнатну квартиру в гуртожитку сімейного типу в м. Київ. Репрезентативна однокімнатна квартира загальною площею 37 м² розміщена на дев'ятому поверсі дев'ятиповерхової будівлі, я показано на рис.1. Будівля відповідає характеристикам масової забудови 80-х років. Площа житлової кімнати – 17,4 м², кухні – 6,3 м², коридору – 4,9 м², висота приміщень 2,5 м. Квартира має одну зовнішню стіну. Вікна і балкон репрезентативної квартири орієнтовані на південь. Вікна в квартирі з подвійним заскленням у дерев'яних спарених плетіннях, балконні двері – подвійні з частковим заскленням. У гуртожитку функціонує канална природна вентиляція. Надходження свіжого повітря в приміщення відповідно до проєкту відбувається шляхом інфільтрації, тобто через нещільності у вікнах та дверях.



Рисунок 1 – план об'єкту дослідження

Проведення досліджень

Якість повітря в квартирі залежить від цілого спектру параметрів, які поділяються на внутрішні та зовнішні, деякі з них є постійними, а деякі динамічно змінюються, основні з них наведені в таблиці 2. Експериментальне визначення кратності повітрообміну ускладнюються впливом динамічних параметрів. Тому важливо провести параметричний аналіз впливових факторів.

Таблиця 2 – Параметри, що впливають на якість повітря в приміщенні

Параметри повітря в приміщенні		
	Зовнішні фактори	Внутрішні фактори
Постійні	-орієнтація за сторонами світу	-геометричні розміри приміщень, площа та об'єм -поверховість будівлі -наявність механічної та природної вентиляції
Змінні	-температура та вологість на вулиці -інсоляційні теплонадходження від сонця -швидкість та напрям вітру -фонове значення вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин	-кількість присутніх, їх вік, стать та активність -початкові умови в приміщеннях -наявність внутрішніх джерел забруднення -механізми надходження свіжого повітря в приміщення, можливі схеми провітрювання -температура повітря та регулювання опалення

Найбільш впливовим фактором на якість повітря є наявність присутніх в приміщенні і їх характеристики. Люди є найбільшим джерелом надходжень CO₂ в кімнату. Щоб проаналізувати взаємозв'язок між концентрацією CO₂ та швидкістю повітрообміну, необхідно розрахувати швидкість утворення CO₂ від дихання людини. Довідник з основ ASHRAE [19] та стандарт ASTM D6245-18 [20] описують оцінку рівня викидів CO₂ наступним чином. Відповідно до довідника ASHRAE емпірична формула для розрахунку коефіцієнта утворення CO₂ (л/с) може бути виражена таким чином:

$$V_{CO_2} = RQ \cdot \frac{0,0055887W^{0,425}H^{0,725}M}{0,23RQ + 0,77}, \quad (1)$$

де: RQ - являє собою дихальний коефіцієнт, об'ємне співвідношення утвореного CO₂ до спожитого кисню (O₂), безрозмірний (дихальний коефіцієнт дорівнює 0,83 для легких або сидячих видів діяльності ($M < 1,5 \text{ met}$, $1 \text{ met} = 58,1 \text{ Вт/м}^2$));

W - маса тіла, (кг);

H - висота тіла (м);

M - швидкість метаболізму (met), залежно від рівня фізичного навантаження.

Наприклад, для дорослої людини середнього зросту ($H = 1,8 \text{ м}$), вагою $W = 85 \text{ кг}$, яка займається сидячою роботою при $M = 1,2 \text{ met}$, відповідна швидкість утворення CO₂ становить 0,006 л/с, що в перерахунку становить 42,57 г/год. Саме такі параметри середньостатистичної людини використовувались в розрахунках для даного дослідження.

Концентрація вуглекислого газу визначалась на прикладі масового балансу репрезентативних приміщень в залежності від ряду параметрів, таких як: природний повітрообмін; фонові концентрації CO₂ (зовнішня концентрація CO₂); початкова концентрація CO₂ в приміщенні; наявність людей; геометричні розміри приміщення. Методика обробки експериментальних результатів концентрації CO₂ наведена в статті [21] була використана для знаходження кратності повітрообміну.

Нижче, як приклад, наведена система рівнянь для розрахунку внутрішньої концентрації CO₂ при сталих значеннях фонові концентрації вуглекислого газу зовні квартири, на вулиці та в коридорі будинку (місцях загального користування) для випадку, за якого припливне повітря надходило шляхом інфільтрації:

$$\begin{cases} CO_{2 \text{ кім}} = CO_{2 \text{ кім } 0} + \frac{V_{\text{пр.кім}}}{V_{\text{кім}}} \int (CO_{2 \text{ зов}} - CO_{2 \text{ кім } i})_{\tau} dt \\ CO_{2 \text{ кор}} = CO_{2 \text{ кор } 0} + \frac{V_{\text{пр.кім}}}{V_{\text{кор}}} \int (CO_{2 \text{ кім } i} - CO_{2 \text{ кор } i})_{\tau} dt + \frac{V_{\text{пр.буд}}}{V_{\text{кор}}} \int (CO_{2 \text{ буд}} - CO_{2 \text{ кор } i})_{\tau} dt \\ CO_{2 \text{ кух}} = CO_{2 \text{ кух } 0} + \frac{V_{\text{пр.кор}}}{V_{\text{кух}}} \int (CO_{2 \text{ кор } i} - CO_{2 \text{ кух } i})_{\tau} dt + \frac{V_{\text{пр.кух}}}{V_{\text{кух}}} \int (CO_{2 \text{ зов}} - CO_{2 \text{ кух } i})_{\tau} dt \\ V_{\text{пр.кор}} = V_{\text{пр.кім}} + V_{\text{пр.буд}} \end{cases}, \quad (2)$$

Вхідні параметри: $CO_{2 \text{ кім } 0}$, $CO_{2 \text{ кор } 0}$, $CO_{2 \text{ кух } 0}$ - концентрація CO₂ початкова в приміщеннях кімнати, коридору та кухні відповідно, г/м³; $CO_{2 \text{ кім } i}$, $CO_{2 \text{ кор } i}$, $CO_{2 \text{ кух } i}$ - концентрація CO₂ в поточний момент часу в приміщеннях кімнати, коридору та кухні відповідно, г/м³;

$V_{\text{кім}}$, $V_{\text{кор}}$, $V_{\text{кух}}$ - об'єм приміщень кімнати, коридору і кухні відповідно, м³; $CO_{2 \text{ кім}}$, $CO_{2 \text{ кор}}$, $CO_{2 \text{ кух}}$, $CO_{2 \text{ вк}}$, $CO_{2 \text{ зов}}$, $CO_{2 \text{ буд}}$ - концентрація CO₂ в приміщеннях кімнати, коридору, кухні, вентканалу, фонові та на коридорі будинку відповідно, г/м³.

Визначалися: $V_{\text{пр.кім}}$, $V_{\text{пр.кор}}$, $V_{\text{пр.кух}}$, $V_{\text{пр.буд}}$ - об'єм припливного свіжого повітря до кімнати, коридору, кухні та з коридору будинку відповідно, м³/год;

Для випадку, коли спостерігалось явище ексфільтрації були виведені аналогічні рівняння.

Система рівнянь була розв'язана з використанням програмного продукту Mathcad з врахуванням динаміки вхідних параметрів у часі.

Кратність повітрообміну визначалась як співвідношення повітряного потоку ззовні в кімнату та об'єму відповідного замкнутого простору:

$$n = \frac{V_{\text{пр.і}}}{V_i}, \quad (3)$$

де $V_{\text{пр.і}}$ - об'єм припливного свіжого повітря до приміщення, м³/год; V_i - об'єм приміщення.

Репрезентативним приміщенням для аналізу впливових факторів було обрано приміщення житлової кімнати. На рис. 2 представлені результати розрахунків концентрації вуглекислого газу в залежності від концентрації CO₂ в припливному повітрі, в яких параметр - початкова концентрація в кімнаті, змінювався від 420 ppm до 2500 ppm (4,50 г/м³). Для демонстрації розрахунків було обрано три випадки, коли стартова концентрація CO₂ в припливному повітрі була на рівні фоновій – 420 ppm (0,76 г/м³), 1300 ppm (2,34 г/м³), 2500 ppm (4,50 г/м³). Об'єм припливного повітря на рис. 2(а) – 10 м³/год, кратність повітрообміну в кімнаті в даному випадку становить 0,23 год⁻¹, на рис. 2(б) - об'єм припливного повітря 30 м³/год (кратність повітрообміну 0,69 год⁻¹), на рис. 2(в) - об'єм припливного повітря 50 м³/год (кратність повітрообміну 1,15 год⁻¹). Складова надходжень від людей відсутня.

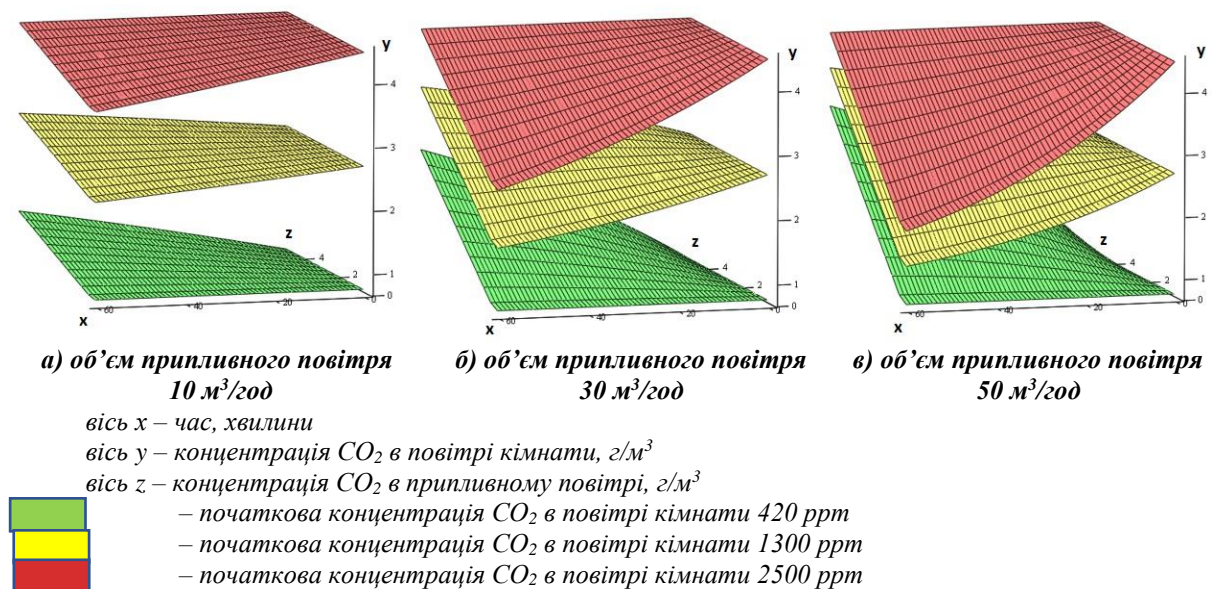


Рисунок 2 – Зміна концентрації вуглекислого газу в залежності від концентрації CO₂ в припливному повітрі

Аналізуючи результати розрахунків представлені на рис. 2 можна зробити висновок, що зі збільшенням об'єму припливного повітря що надходить до приміщення збільшується швидкість зміни концентрації CO₂ в приміщенні. При цьому, чим більша різниця між стартовою концентрацією CO₂ в приміщенні і концентрацією CO₂ в припливному повітрі, тим більший діапазон зміни концентрації CO₂.

На рис. 3 наведено зміну концентрації CO₂ в приміщенні житлової кімнати в залежності від об'єму припливного повітря що надходить до приміщення за умов динамічної зміни концентрації CO₂ в припливному повітрі. Для випадків I – концентрація CO₂ в припливному повітрі змінювався від 2500 ppm (4,50 г/м³) до 1700 ppm (3,06 г/м³), для випадків II – навпаки зростала від 1700 ppm до 2500 ppm.

Для умов, коли стартова концентрація CO₂ в припливному повітрі становить 4,50 г/м³ і значно більша за стартову концентрацію CO₂ в приміщенні 1,08 г/м³ (рис. 3а (випадки II)), рівень CO₂ в приміщенні спочатку зростає, але через деякий час досягнув свого піку і також почав зменшуватись. Для умов наведених на рис. 3а (випадки I) рівень CO₂ в кімнаті зменшуватиметься, адже в приміщення надходитиме повітря з меншою концентрацією. Зворотні випадки, коли концентрація CO₂ в припливному повітрі динамічно зростає, і відповідно зростає рівень CO₂ в приміщенні зображені на рис. 3б.

Додатковим джерелом CO₂ в приміщенні є виділення від людей. Як зазначалось вище, виділення вуглекислого газу середньостатистичним чоловіком становлять близько 42,57 г/год. Присутність людей змінює тенденцію зміни концентрації CO₂ в приміщенні, що відображено на рис. 4.

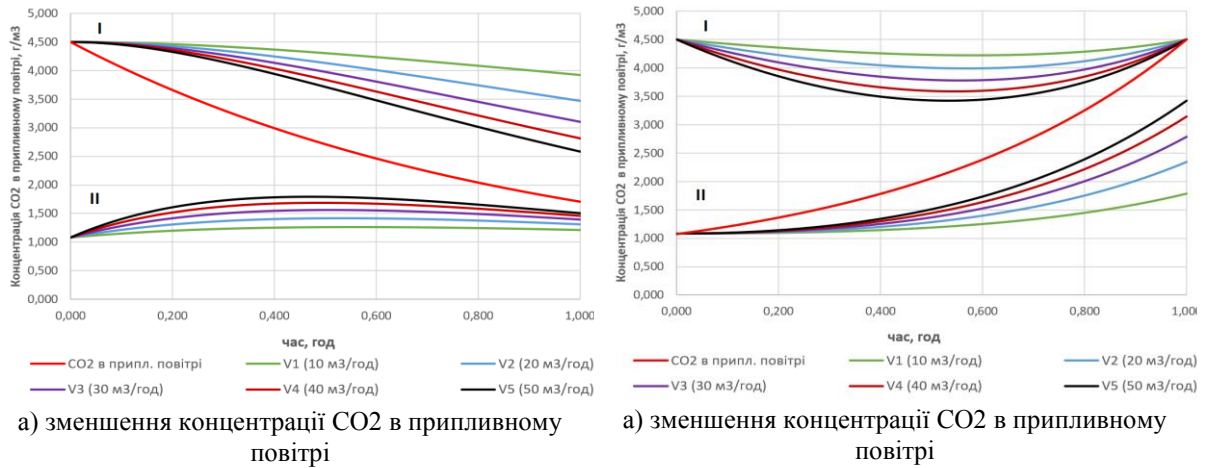
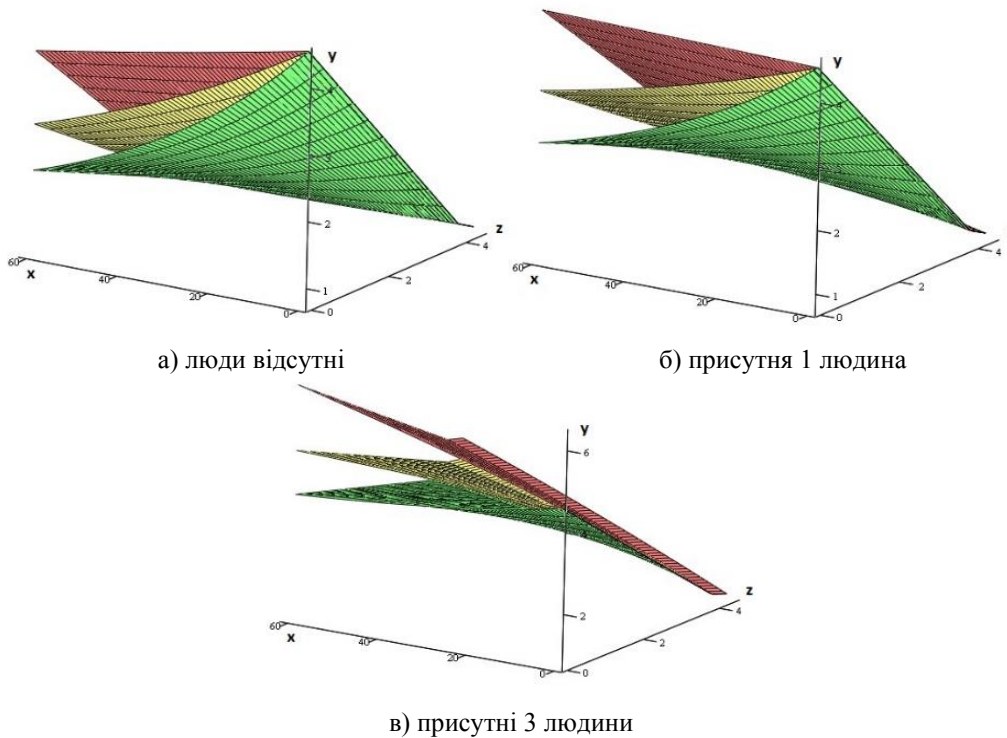


Рисунок 3 – Зміна концентрації вуглекислого газу в часі за умов динамічної зміни концентрації CO₂ в припливному повітрі



вісь x – час, хвилини;
 вісь y – концентрація CO₂ в повітрі кімнати, г/м³
 вісь z – концентрація CO₂ в припливному повітрі, г/м³

- об'єм припливного повітря 50 м³/год
- об'єм припливного повітря 30 м³/год
- об'єм припливного повітря 10 м³/год

Рисунок 4 – Динамічна зміна концентрації вуглекислого газу в приміщенні житлової кімнати в присутності людей

Відповідно, зі збільшенням присутніх в приміщенні необхідний більший об'єм припливного повітря задля забезпечення відповідних умов мікроклімату. Для цієї серії розрахунків було виділено діапазон 2500 - 420 ppm стартової концентрації CO₂, значення в зовнішньому припливному повітрі приймалось сталим на рівні 420 ppm, об'єм припливного повітря 10 м³ (червона площа), 30 м³ (жовта площа), 50 м³ (зелена площа).

Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 [22] та ДСТУ Б EN 15251:2011 [23], рекомендований рівень вуглекислого газу в приміщеннях існуючих будівель не повинен перевищувати 800 ppm вище зовнішньої, тобто типове значення 1200 ppm. Тобто для кімнати площею 17,4 м² в якій 3 дорослі людини займаються

сидячою роботою, необхідно забезпечувати кратність повітрообміну на рівні $2,01 \text{ год}^{-1}$ щоб рівень CO_2 в повітрі не перевищував максимально допустимий рівень.

Також проводилась серія експериментальних досліджень зміни концентрації CO_2 в репрезентативних приміщеннях квартири в літній період. Підвищення рівня вуглекислого газу відбувалось шляхом спалювання сухого спирту. Вимірювання проводились в приміщеннях житлової кімнати, кухні, коридору квартири та у вентиляційному каналі, що виходить на кухню з кроком 1 хв. Заміри проводились відповідно плану експерименту наведеному в [24]. В рамках експерименту фіксувались кліматичні дані, а саме температура в приміщеннях квартири, зовнішня температура, напрямок та сила вітру. Для літнього періоду у місті Київ характерними є західний, північно-західний та північний напрямки вітру [25]. В період проведення досліджень переважаючим був північно-західний напрямок вітру. Заміри проводились в денний період, коли зовнішня температура була $(+21^\circ\text{C})$ - $(+30^\circ\text{C})$. Також на початку та вкінці експерименту фіксувались значення рівня CO_2 на коридорі гуртожитку, який тримався в межах 410-460 ppm. Рівень вуглекислого газу в зовнішньому повітрі під час експериментів був в межах 410-435 ppm.

Як і у попередніх дослідженнях [24] за результатами вимірювань чітко прослідковується залежність явищ інфільтрації та ексфільтрації від напрямку вітру. При північно-західному напрямку вітру свіже повітря надходило через вентиляційний канал (рис. 5а). При південному, південно-західному, південно-східному напрямках повітря надходило через вікна і двері, а виходить через вентиляційний канал (рис. 5б), адже тенденції зміни концентрації вуглекислого газу в приміщенні кухні і вентканалу подібні.

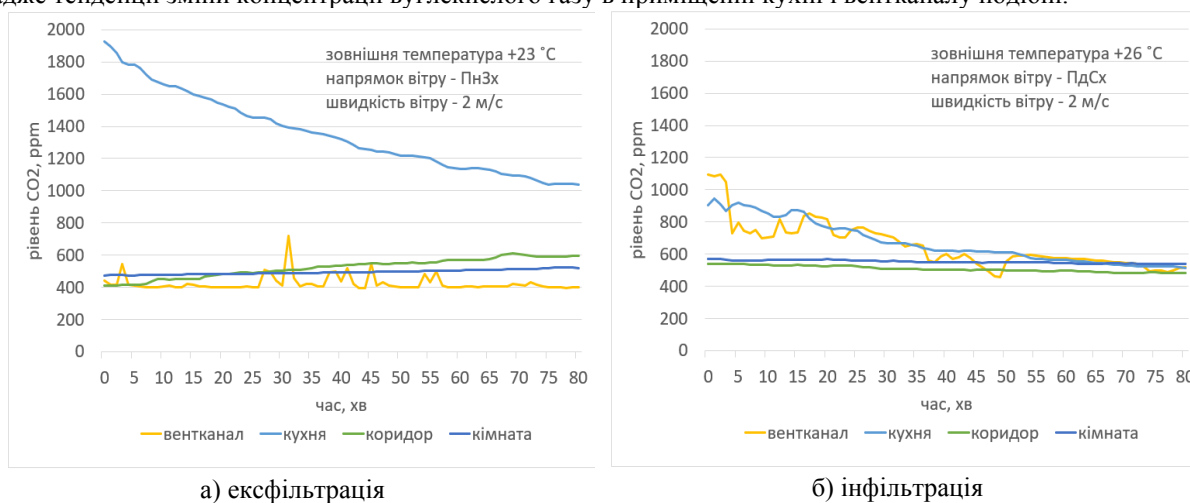


Рисунок 5 – Фактична зміна концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири

Після обробки усіх серій досліджень, було встановлено, що виведена система рівнянь (2) достатньо точно описує фактичні зміни CO_2 в приміщеннях для обох механізмів переносу повітря. На рисунку 6 наведені графіки результатів обрахунку типових дослідів за умов підвищення рівня вуглекислого газу в різних приміщеннях квартири. Максимальна розбіжність між фактичним та розрахованим значенням становила $\pm 50 \text{ ppm}$ і пов'язана з похибкою вимірювальних приладів, а також перепадами концентрації CO_2 у вентканалі, який є спільним для усього стояка.

Згідно дослідження [24] для зимового періоду характерним є підсмоктування свіжого повітря до приміщень квартири через вікна, в літній період явища інфільтрації та ексфільтрації були зафіксовані в майже однаковій кількості. Також було визначено фактичну кратність повітрообміну для обох механізмів руху повітря в квартирі. Вікна та балконні двері квартири орієнтовані на Пд, відповідно при вітрі Пд, Пд-Сх, Пд-Зх напрямком, величина кратності повітрообміну більша.

На сьогоднішній день, більшість діючих стандартів не мають чіткого визначеного методу для встановлення мінімального обсягу повітрообміну, а лише пропонують рекомендації стосовно того, як визначати цей параметр. У відповідності до стандарту ДБН В.2.2-15:2019 "Житлові будинки. Основні положення", мінімальна кратність повітрообміну при проектуванні для загальних кімнат, спалень, дитячих та кабінетів у будинках з природною вентиляцією становить $0,5 \text{ год}^{-1}$, а для кухонь - $1,5 \text{ год}^{-1}$. При проведенні енергетичної сертифікації будівель енергоаудиторами приймається, що обсяг повітрообміну в житлових будинках з природною вентиляцією становить $0,6 \text{ год}^{-1}$ відповідно до ДСТУ 9091:2022 "Енергетична ефективність будівель", що збігається із рекомендованими значеннями витрат вентиляції у стандарті EN 16798-1:2019. Відповідно стандарту ASHRAE 62.2-2022 [5] можна використовувати загальні табличні значення кратності повітрообміну (л/с) для всієї квартири які залежать від площі житла та кількості спалень, або визначити за формулою:

$$Q_{tot} = 0,15A_{floor} + 3,5(N_{br} + 1), \quad (4)$$

де:

Q_{tot} – загальний необхідний рівень повітрообміну, л/с;

A_{floor} – площа житла, м²;

N_{br} – кількість спалень.

Об'єм повітря, який обчислений за формулою (4) для квартири із однією спальнею та загальною площею 37 м², становить 12,55 літрів на секунду. Це відповідає кратності повітрообміну 0,49 год⁻¹.

Порівнюючи розраховані фактичні значення кратності повітрообміну в досліджуваній квартирі із величинами в діючих стандартах для умов експлуатації можна зробити висновок про те, що фактичні значення кратності повітрообміну перевищують нормативні.

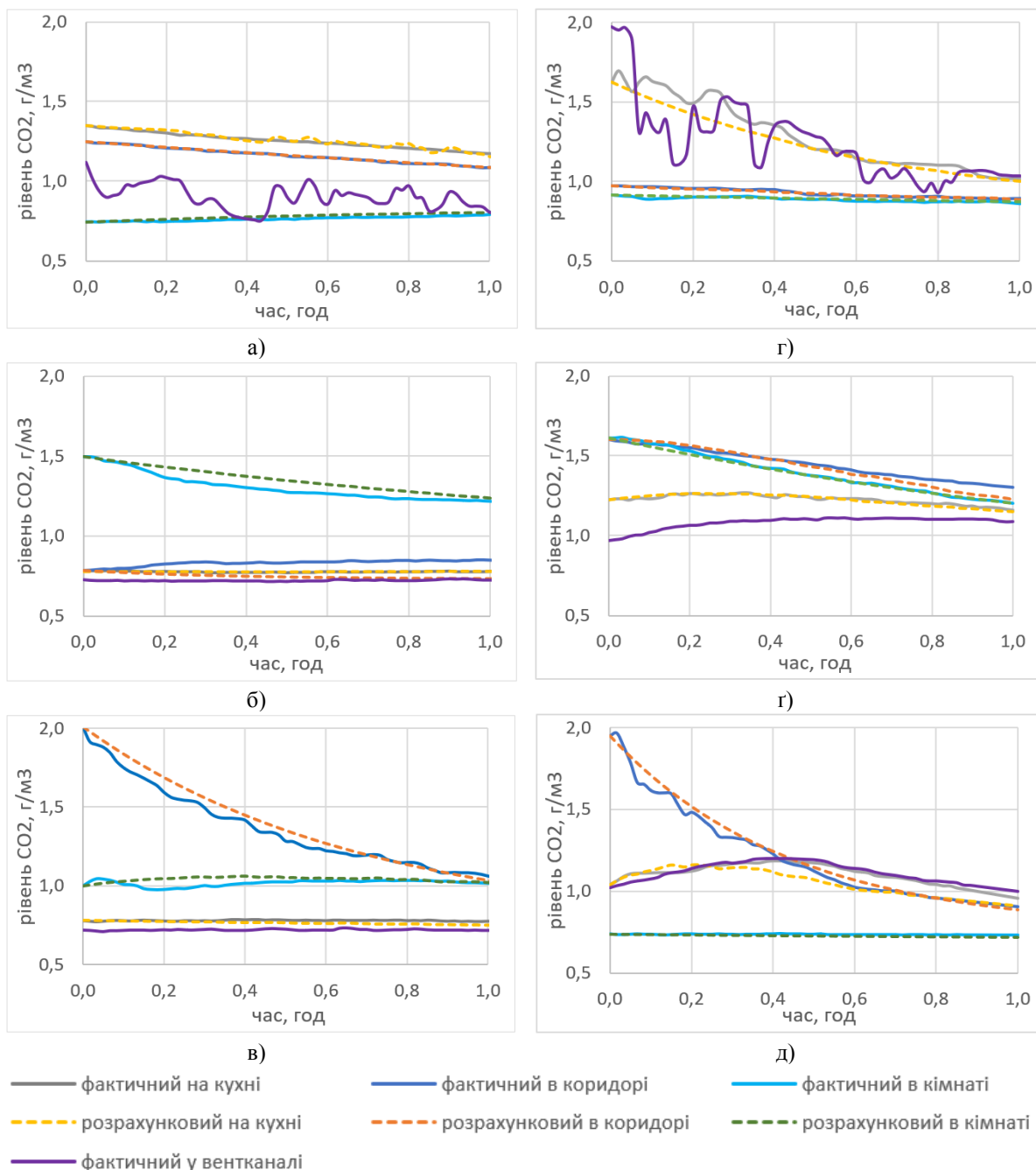


Рисунок 6 – Фактична та розрахована концентрації вуглекислого газу в приміщеннях квартири за умов ексфільтрації (а, б, в) та інфільтрації (г, д, е) при підвищенні рівня вуглекислого газу в різних приміщеннях репрезентативної квартири а), г) - збільшення рівня CO₂ в приміщенні кухні; б), д) - збільшення рівня CO₂ в приміщенні кімнати; в), е) - збільшення рівня CO₂ в приміщенні коридору

Висновки:

Забезпечення нормативної кратності повітрообміну є одним із головних характеристик енергоефективної будівлі. Зазвичай вимоги до повітрообміну в житлових приміщеннях задаються для всього житла, рідше для окремих типів приміщень. Використання постійних значень кратності повітрообміну є зручним та доцільним при розробці енергетичних сертифікатів та проектування. Однак фактично на якість повітря в приміщенні впливає не лише величина кратності повітрообміну, а і інші впливові фактори. Одним з яких є рівень вуглекислого газу. В результаті досліджень встановлено, що найбільший впливовим параметром зміни концентрації CO₂ в приміщенні є виділення від дихання людей. На основі експериментальних та розрахункових даних було встановлено, що для типової малогабаритної квартири в літній період фактична кратність повітрообміну в цілому перевищує нормативні значення. З результатів імітаційного моделювання слідує, що для забезпечення нормативного рівня концентрації CO₂ не вище 1200 ppm необхідно дотримуватись повітрообміну в розглянутому приміщенні не нижче рівня 2,01 год⁻¹ для умов, коли в кімнаті постійно перебуває 3 людини. Тобто масовий баланс CO₂, з врахуванням кількості мешканців, може бути привабливим альтернативним методом прогнозування інтенсивності вентиляції будівлі. Співвідношення кількісних даних кратності повітрообміну, що спостерігалось для літнього та зимового періоду показує, що влітку природня концентрація відбувається переважно під впливом винд- ефекту, а взимку – комбінації переважно стак- та винд-ефекту.

Список використаної літератури.

1. Аналіз впливу розподілення повітрообміну між кімнатами на енергоспоживання квартири / В. І. Дешко та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 1. С. 39–50.
2. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia / V. Földváry et al. *Building and environment*. 2017. No. 122. P. 363–372.
3. Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic / S. Vilcekova et al. *Building and environment*. No. 120. P. 29–40.
4. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010. Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. Replaces ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2007. Official edition. ASHRAE, 2012.
5. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022. Ventilation and acceptable indoor air quality in residential buildings. Replaces ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Official edition. Atlanta, Georgia : ASHRAE, 2022.
6. Bilous I., Dешко V., Sukhodub I. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of civil engineering*. 2020. Vol. 96(4). P. 27–41. URL: https://www.academia.edu/76773042/Building_energy_modeling_using_hourly_infiltration_rate (date of access: 27.09.2023).
7. Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou / A. Sfakianaki et al. *Building and Environment*. 2008. Vol. 43, no. 4. P. 398–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006> (date of access: 27.09.2023).
8. Shi S., Chen C., Zhao B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. *Building and environment*. 2015. Vol. 92. P. 528–537. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.027> (date of access: 27.09.2023).
9. Assessment of indoor environmental quality in existing multi-family buildings in North-East Europe / L. Du et al. *Environment international*. 2015. Vol. 79. P. 74–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.001> (date of access: 27.09.2023).
10. Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations / S. Goubran et al. *Energy and buildings*. 2017. Vol. 138. P. 579–590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.071> (date of access: 27.09.2023).
11. Sherman M. H., Walker I. S., Lunden M. Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods. *International journal of ventilation*. 2014. Vol. 13(1):13-27. URL: <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684034> (date of access: 27.09.2023).
12. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia / V. Földváry et al. *Building and environment*. 2017. Vol. 122. P. 363–372. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.009> (date of access: 27.09.2023).
13. Determining the ventilation and aerosol deposition rates from routine indoor-air measurements / C. H. Halios et al. *Environmental monitoring and assessment*. 2013. Vol. 186(1). URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3362-5> (date of access: 27.09.2023).
14. Sherman M. Analysis of errors associated with passive ventilation measurement techniques. *Building and environment*. 1989. Vol. 24, no. 2. P. 131–139. URL: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90002-4) (date of access: 27.09.2023).
15. Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children / G. Bekö et al. *Building and environment*. 2010. Vol. 45, no. 10. P. 2289–2295. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.014> (date of access: 27.09.2023).

16. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (en 15251:2007, idt). На заміну уведено вперше ; чинний від 2023-01-01. Вид. офіц. Київ : Держ. підприємство "Укрархбудінформ", 2012. 71 с.
17. Przekop R. Oxygen transport in human alveolar sacs. Chemical engineering transactions. 2011. Vol. 24. P. 565–570. URL: <https://doi.org/10.3303/CET1124095> (date of access: 27.09.2023).
18. Kapalo P., Voznyak O. Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode. Journal of civil engineering, environment and architecture. 2016. Vol. 62 (4/15). P. 201–210. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2015.189> (date of access: 27.09.2023).
19. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2013 ASHRAE handbook : fundamentals. Atlanta, GA : ASHRAE, 2013.
20. ASTM D6245-18. Standard guide for using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilatio. Replaces ASTM D6245-12 ; effective from 2023-06-01. Official edition. West Conshohocken, PA : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2018.
21. Integrated approaches to determination of CO2 concentration and air rate exchange in educational institution / V. Deshko et al. Rocznik ochrona środowiska. 2020. Vol. 22. P. 82–104.
22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. На заміну СНиП 2.04.05-91 Опалення, вентиляція и кондиціонування. Крім розділу 5 та додатка 22 ; чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 147 с.
23. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики (EN 15251:2007, IDT). Чинний від 2013-07-01. Вид. офіц. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2012. 65 с.
24. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Гетманчук Г. О. Дослідження повітрообміну в квартирі на основі експериментального визначення масопереносу со2. Енергетика і автоматика. 2023. Т. 3.
25. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 і таблицю 2 ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 ; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ : Укрархбудінформ, 2011. 123 с.

V. Deshko^{1,2}, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

Bilous^{1,3}, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6640-103X

Н. Hetmanchuk¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-1655-8642

¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

³General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

PARAMETRIC ANALYSIS OF NATURAL AIR EXCHANGE IN MULTI-APARTMENT RESIDENTIAL BUILDINGS

Most multi-apartment residential buildings built in the 20th century in Central and Eastern Europe do not meet modern energy efficiency requirements. The main part of the thermal energy consumed by buildings is used to heat the supply air from outside, which is the largest share in the energy balance of buildings. The purpose of this research is a parametric analysis of influencing factors on the frequency of air exchange in the room and an experimental study of the concentration of CO₂ in a typical apartment. The object of the study is a one-room apartment in a family-type dormitory in the city of Kyiv. The dormitory has ducted natural ventilation. In the work, experimental measurements of the concentration of carbon dioxide were carried out in the premises of the living room, kitchen, corridor of the apartment and in the ventilation channel in the summer period. The indicator gas method was used to measure the air exchange rate. During air infiltration, the average rate of air exchange in the absence of people in the apartment in the living room was 2.41 h⁻¹, in the corridor - 2.34 h⁻¹, in the kitchen - 0.57 h⁻¹. Under exfiltration conditions, the average values were lower: living room – 0.24 h⁻¹, corridor – 0.94 h⁻¹, kitchen – 0.52 h⁻¹. The dependence between wind directions and the phenomena of infiltration and exfiltration in the premises of the apartment was recorded. As a result of the research, it was established that the most influential parameter of the change in the concentration of CO₂ in the room is the release from people's breath. It follows from the simulation results that to ensure the regulatory level of CO₂ concentration is not higher 1500 ppm, it is necessary to observe the air exchange in the considered room not lower than the level of 1.51 h⁻¹ for conditions when 2 people are constantly in the room. That is, the mass balance of CO₂, which takes into account the number of inhabitants, can be an attractive alternative method for predicting the intensity of ventilation of a building.

Keywords: air exchange, natural ventilation, carbon dioxide concentration, mass transfer, parametric analysis, microclimate conditions

References

1. V. I. Deshko, I. Yu. Bilous, I. O. Sukhodub, and O. I. Yatsenko, "Analiz vplyvu rozpodilennia povitroobminu mizh kimmnatamy na enerhospozhyvannia kvartyry", *Enerhetyka: Ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, no. 1, pp. 39–50, 2021.
2. V. Földváry, A. Aaa, A. Aaa, and A. Aaa, "Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia", *Building Environ.*, no. 122, pp. 363–372, 2017.
3. S. Vilcekova, L. Meciarova, E. Burdova, and D. Kosicanova, "Indoor environmental quality of classrooms and occupants' comfort in a special education school in Slovak Republic", *Building Environ.*, no. 120, pp. 29–40.
4. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010, ANSI/ASHRAE, 2012.
5. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022, ASHRAE, Atlanta, Georgia, 2022.
6. I. Bilous, V. Deshko, and I. Sukhodub, "Building energy modeling using hourly infiltration rate", *Mag. Civil Eng.*, vol. 96(4), pp. 27–41, 2020. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.academia.edu/76773042/Building_energy_modeling_using_hourly_infiltration_rate
7. A. Sfakianaki, K. Pavlou, M. Santamouris, and I. Livada, "Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou", *Building Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 398–405, 2008. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006>
8. S. Shi, C. Chen, and B. Zhao, "Air infiltration rate distributions of residences in Beijing", *Building Environ.*, vol. 92, pp. 528–537, 2015. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.027>
9. L. Du, T. Prasauskas, V. Leivo, and M. Turunen, "Assessment of indoor environmental quality in existing multi-family buildings in North-East Europe", *Environ. Int.*, vol. 79, pp. 74–84, 2015. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.001>
10. S. Goubran, D. Qi, W. F. Saleh, and L. (. Wang, "Comparing methods of modeling air infiltration through building entrances and their impact on building energy simulations", *Energy Build.*, vol. 138, pp. 579–590, 2017. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.071>
11. M. H. Sherman, I. S. Walker, and M. Lunden, "Uncertainties in Air Exchange using Continuous-Injection, Long-Term Sampling Tracer-Gas Methods", *Int. J. Ventilation*, vol. 13(1):13-27, 2014. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684034>
12. V. Földváry, G. B. Bekö, S. Langer, K. Arrhenius, and D. Petráš, "Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia", *Building Environ.*, vol. 122, pp. 363–372, 2017. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.009>
13. C. H. Halios, C. G. Helmis, K. Deligianni, and S. Vratolis, "Determining the ventilation and aerosol deposition rates from routine indoor-air measurements", *Environmental Monit. Assessment*, vol. 186(1), 2013. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3362-5>
14. M. Sherman, "Analysis of errors associated with passive ventilation measurement techniques", *Building Environ.*, vol. 24, no. 2, pp. 131–139, 1989. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90002-4)
15. G. Bekö, T. Lund, F. Nors, and J. Toftum, "Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children", *Building Environ.*, vol. 45, no. 10, pp. 2289–2295, 2010. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.014>
16. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osvittlennia ta akustyky (en 15251:2007, idt), DSTU B EN 15251:2011, Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, Kyiv, 2012.
17. R. Przekop, "Oxygen transport in human alveolar sacs", *Chem. Eng. Trans.*, vol. 24, pp. 565–570, 2011. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3303/CET1124095>
18. P. Kapalo and O. Voznyak, "Experimental measurements of a carbon dioxide concentration for determining of a ventilation intensity in a room at pulsing mode", *J. Civil Engineering, Environ. Architecture*, vol. 62 (4/15), pp. 201–210, 2016. Accessed: Sep. 27, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7862/rb.2015.189>
19. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013 ASHRAE Handbook : Fundamentals. Atlanta, GA: ASHRAE, 2013.
20. Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilatio, ASTM D6245-18, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
21. V. Deshko, I. Bilous, V. Vynogradov-Saltykov, M. Shovkaliuk, and H. Hetmanchuk, "Integrated approaches to determination of CO2 concentration and air rate exchange in educational institution", *Rocz. Ochr. Srodowiska*, vol. 22, pp. 82–104, 2020.
22. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia, DBN V.2.5-67:2013, Instytut «UkrNDIspetsbud», Kyiv, 2013.
23. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen dlia proektuvannia ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel po vidnoshenniu do yakosti povitria, teplovoho komfortu, osvittlennia ta akustyky (EN 15251:2007, IDT), DSTU B EN 15251:2011, DP «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivnykh konstruksii» (NDIBK), Kyiv, 2012.
24. V. I. Deshko, I. Yu. Bilous, and H. O. Hetmanchuk, "Doslidzhennia povitroobminu v kvartyri na osnovi eksperymentalnoho vyznachennia masoperenosu so2", *Enerhetyka i avtomatyka*, vol. 3, 2023.
25. Budivselna klimatolohiia, DSTU-N B V.1.1-27:2010, Minrehionbud Ukrainy, Kyiv, 2011.

Надійшла: 17.10.2023

Reviewed: 17.10.2023

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 62-833.4

DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290898

Д.А. Яковлев¹, аспірант, ORCID 0000-0002-8176-6627

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МУЛЬТИСЕНСОРНА СИСТЕМА ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ WI-FI

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується дедалі більшою потребою у системах контролю за станом та ефективним функціонуванням електрообладнання. Поломка або не запланована зупинка двигуна електромеханічної системи супроводжуються значними економічними втратами для підприємств. Тому сучасний етап розвитку промисловості характеризується дедалі більшою потребою у системах контролю за станом та ефективним функціонуванням електрообладнання.

Як результат через швидкий розвиток технологій точного виробництва було проведено багато досліджень у сфері мультисенсорних вимірювань та технологій злиття даних з метою покращення можливостей моніторингу з точки зору точності вимірювань та інформаційного багатства, тим самим підвищуючи ефективність та точність виробництва. У мультисенсорній системі кожен датчик самостійно вимірює певні параметри. Потім система використовує відповідний алгоритм обробки сигналів, щоб об'єднати всі незалежні вимірювання в повний набір результатів вимірювань.

Точна оцінка технічного стану дає змогу спрогнозувати термін наступного ремонту обладнання, підвищує надійність та ефективність його роботи, знижує збиток від простою обладнання внаслідок аварій, витрати на ремонт та відновлення працездатності, знижує витрати на обслуговування та експлуатацію обладнання.

У цій статті представлений огляд інтелектуальної мультисенсорної системи процесу моніторингу та технологічного стану електрообладнання. Яка в режимі реального часу за допомогою датчиків дає можливість отримати інформацію з навколишнього середовища, та робити висновки про стан діагностованого обладнання. Технологія інтелектуальної мультисенсорної системи для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання має перспективи широкого застосування у галузях промисловості. Завдяки максимально компактним розмірам установки, маємо можливість проводити виміри в важко доступних місцях, без виводу обладнання з роботи, що мінімізує втрати від простою. Також використання даної системи дозволяє виявити розвиток дефекту на ранніх стадіях розвитку, що перешкоджає і значно зменшує вартість ремонту енергетичного обладнання при виході з справного стану.

Ключові слова: джерело енергії, автономне електропостачання, мультисенсорна система, оцінка технічного стану, інтелектуальна система, дистанційне діагностування.

Вступ

Через все більш жорсткі вимоги до екології, промислові виробництва змушені будуватися на значній відстані від населених пунктів. Що створює власникам фірм не бажанні додаткові витрати на доставку та проживання працівників на виробництві, завдяки розвитку швидкості та стабільності інтернету де далі більше виробництв переходять на дистанційне керування.

Водночас актуальною є проблема високої аварійності електроустаткування, оскільки значна частина устаткування керується дистанційно і немає можливості замітити малі не суттєві несправності. Електричні машини використовуються в приводах практично у всіх областях техніки і технологічного

оснащення виробництва. Раптова відмова або позапланова зупинка електрообладнання для підприємства супроводжуються значними економічними втратами. Особливо великі втрати на великих енергетичних установках і об'єктах, тому технічна діагностика в цій області досить розвинена і є обов'язковою для попередження відмов і своєчасного ремонту.

Метою дослідження є розроблення концепції будови електронного носа для діагностування електроприводів з використанням Wi-Fi.

В даній статті зазначений опис електронний ніс Wi-Fi технології мультисенсорного вимірювання та злиття даних. Розглянуто архітектуру мультисенсорної вимірювальної системи. На додаток до мультисенсорної системи вимірювання, узагальнено відповідні методи та алгоритми злиття даних. Подальші погляди на багато сенсорний моніторинг та технологію злиття даних включені в кінці цієї статті.

Науково-прикладне завдання:

- визначити можливі стани електропривода;
- для кожного стану електропривода визначені характерні газові випаровування;
- підібрати комплект датчиків які з високою точністю визначають концентрацію компонентів у повітрі;
- розробити алгоритм роботи комплексу обладнання технічного діагностування на оснвні роботи принципів нейронної системи і електронних газових датчиків;
- перевірити розроблений діагностичний комплекс електронних аналізаторів газів для визначення стану автономного генератора електричної енергії на базі двигуна внутрішнього згорання.

Об'єктом дослідження є інтелектуальна мультисенсорна системи для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання.

Предметом дослідження є система контролю за технічним станом та ефективним функціонуванням електрообладнання.

Методи дослідження. Використовуємо дослідження у сфері мультисенсорних вимірювань та технології злиття даних з метою покращення можливостей моніторингу з точки зору точності вимірювань та інформаційного багатства, тим самим підвищуючи ефективність та точність виробництва, а також аналіз мультисенсорних систем. Викладено особливості побудови системи вимірювання та моніторингу.

Виклад основного матеріалу.

Електронний ніс — електронний прилад, призначений визначення запахів чи при смаків. За останнє десятиліття «електронні сенсорні» або «е-сенсорні» технології зазнали серйозного розвитку з технічної та комерційної точок зору. Термін «електронний сенсор» означає здатність відтворювати людські почуття під час використання сенсорних масивів та відповідних систем розпізнавання. Починаючи з 1982 [1] проводилися дослідження з розвитку технології електронного носа, яка могла б виявляти та розпізнавати запахи та присмаки. Етапи процесу розпізнавання аналогічні до людського нюху: виконується ідентифікація, порівняння, кількісне визначення та інші процеси, включаючи зберігання та пошук даних. Проте гедоністичні оцінки специфічні лише людського носа, оскільки пов'язані з суб'єктивним думкою. Ці пристрої пройшли серйозний розвиток і використовуються у промислових цілях.

В даний час до систем функціональної діагностики двигуна пред'являються такі вимоги:

- Простота в управлінні при практичній експлуатації в умовах складної обробки діагностичної інформації;
- Застосування цифрових інформаційних технологій, універсальних алгоритмів та швидкодіюча апаратура;
- Автоматизація процедур накопичення, систематизації та класифікації статистичних даних випробуваного електродвигуна в цілому;
- Мінімальна маса системи.

Для того, щоб діагностична система працювала з максимальною ефективністю, в кожному конкретному випадку необхідно вирішити задачу вибору мінімально достатньої кількості діагностичних параметрів. Розглянемо структурну схему для електродвигуна на базі синхронного електродвигуна, який набув популярності в останні за рахунок програм по відновлювальній енергетики і розвитку машинобудівництва.

Електродвигун має кілька важливих компонентів які включають в себе:

Ротор - це рухома частина електродвигуна. Він обертає вал, який забезпечує механічну потужність, згадану вище.

2) Статор є нерухомою частиною електромагнітного кола і зазвичай складається з обмоток або постійних магнітів. Сердечник статора складається з багатьох тонких металевих листів, які називаються шарами.

3) Підшипники. Ротор електродвигуна підтримується підшипниками, які дозволяють йому обертатися навколо своєї осі. Ці підшипники, у свою чергу, спираються на корпус двигуна. Вал двигуна

проходить через підшипники до зовнішньої частини двигуна, де прикладається навантаження. Оскільки сили вантажу діють за межі зовнішнього підшипника, вантаж називають «звисяючим».

4) Обмотки – це дроти, укладені в котушки, зазвичай обгорнуті навколо багатошарового магнітного сердечника з м'якого заліза, щоб утворити магнітні полюси під час живлення струмом

5) Повітряний зазор. Хоча повітряний зазор не є фізичним компонентом, він є відстанню між ротором і статором. Повітряний зазор вашого двигуна має важливий вплив і, як правило, є якомога меншим, оскільки великий зазор сильно негативно впливає на продуктивність.

6) Комутатор — це механізм, який використовується електродвигуном для перемикання вхідного сигналу, більшості двигунів постійного струму та деяких двигунів змінного струму.

7) Контактні кільця - вид електричних контактів, виготовлених у вигляді кільця до якого притискаються щітки, що передають енергію

8) Щітковий вузол - забезпечує передачу енергії від провідника на контактні кільця.

9) Провідник - матеріал, що проводить електричний струм.

10) Система охолодження.

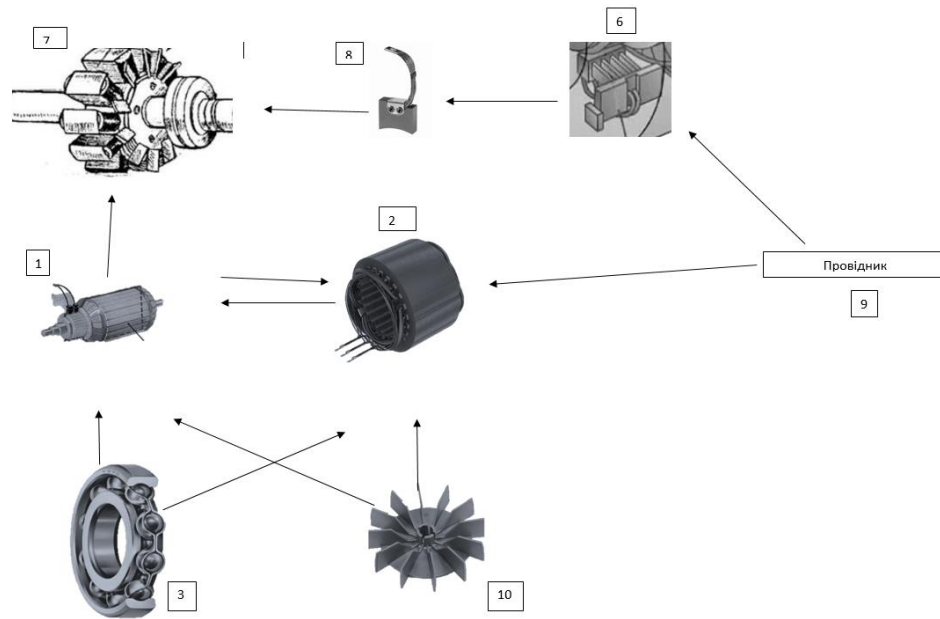


Рисунок 1 – Компоненти електродвигуна

Зазвичай для цієї задачі використовують повітряне охолодження за рахунок вентилятора в вигляді крильчатки встановленої на вал двигуна, яка нагнітаючи повітря, відводить тепло за межі агрегату. Щоб двигун міг працювати в обох напрямках, крильчатки бувають дво-направленими, виготовляють їх із міцного пластику, алюмінію чи сталі. Корпус двигуна зазвичай має ребра, розташовані по шляху руху повітря, що значно покращує охолодження мотора. Проте існують і інші системи охолодження наприклад водяна система яка дозволяє зменшити розміри електродвигуна та збільшити струми та моменти за рахунок більш швидшого охолодження.

Одним з головних критеріїв вибору діагностичного параметру системи серед можливих фізичних параметрів, які характеризують технічний стан, є інформативний. Діагностичний параметр, вибраний за інформативним критерієм, дозволяє з найбільшою вірогідністю визначити стан об'єкта, що досліджується.

Для вибору діагностичного параметру скористаємось структурною схемою (рис.1). Система, що розглядається, складається з N=8 елементів. За можливі стани приймемо відмову кожного елементу. Контроль стану електродвигуна плануємо за кількістю параметрів рівному кількості елементів. Слід відмітити, що в загальному випадку кожний з елементів може мати декілька діагностичних параметрів. В результаті дослідження відмов елементів системи створена таблиця станів (табл. 1). Вірогідність відмов кожного елементу для попереднього розгляду приймемо:

$$P(S_i) = \frac{1}{N} = \frac{1}{8} \quad (1)$$

Вихідна ентропія системи визначається кількістю можливих станів:

$$H(S_i) = \sum_{i=1}^n P(N_i) \log_2 P(N_i) = -8 * (1/8) * \log_2(1/8) = 3, \text{ біт} \quad (2)$$

Позначимо через m_1 - число одиниць в кожному рядку таблиці, m_0 - число нулів в тому ж рядку.

Залишкова невизначеність при контролі кожного параметра на першому кроці обчислюється за формулою.

$$H\left(\frac{A}{Z_k}\right) = \frac{m_1}{N} \log_2 m_1 + \frac{m_0}{N} \log_2 m_0 \quad (3)$$

Таблиця 1 – Таблиця станів

Діагностичний параметр Z_k	стан								$H(A/Z_k)$
	A_8	A_7	A_3	A_1	A_2	A_6	A_9	A_{10}	
1	0	1	1	1	1	1	1	1	2,456436
2	0	0	1	1	1	1	1	1	2,188722
3	0	0	0	1	1	1	1	1	2,045566
4	0	0	0	0	1	1	1	1	2
5	0	0	0	0	0	1	1	1	2,045566
6	0	0	0	0	0	0	1	1	2,188722
7	0	0	0	0	0	0	0	1	2,456436
8	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Отримуємо наглядну діаграму (рис.2), з якої видно що для оптимального діагностування достатньо знати 5 параметрів для такого типу двигуна.

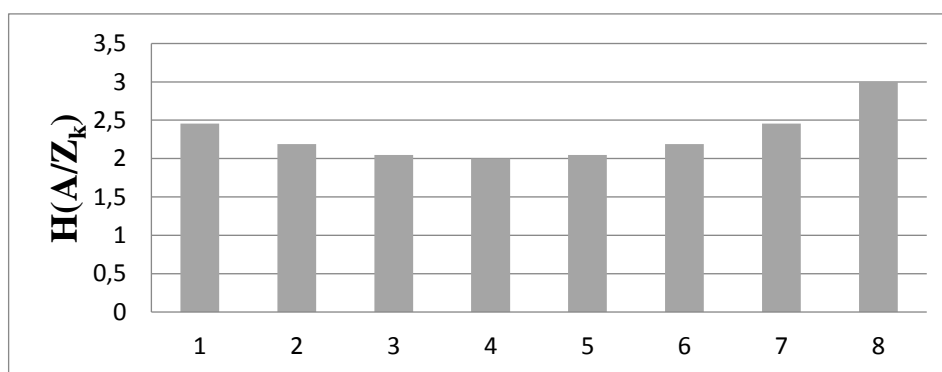


Рисунок 2 – Діаграма ентропії системи

Принцип роботи системи.

Електронний ніс для діагностування електроприводу з Wi-Fi рис. 3 був розроблений для кількісної оцінки та кваліфікації стану електроприводу з можливістю передачі даних на відстань. Для діагностичного обладнання існує ряд вимог. Основними з яких є компактність та простота використання. Звідси випливає основна концепція дизайну установки полягає в інтеграції на одній платі всіх компонентів (тобто джерело живлення, матриця датчиків, Wi-Fi модуль, SD карта, мікро контролер тощо) та установка в компактний корпус.

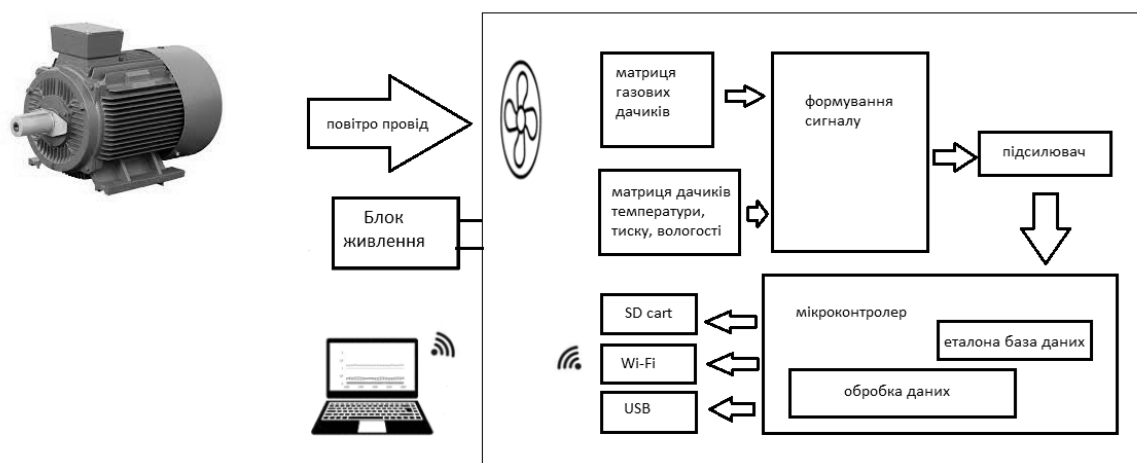


Рисунок 3 - Блок схема

Розроблена система має покращені технічні та експлуатаційні характеристики:

1. Широка номенклатура датчиків та широкий перелік вимірюваних параметрів забезпечують достовірність опису фізичних процесів двигуна та формування повної сукупності вимірювальної інформації, необхідної для функціональної діагностики технічного стану двигуна.

2. Застосування модуля бездротової передачі дозволяє:

– знизити вартість та масо габаритні параметри системи, підвищити надійність передачі даних за рахунок передачі результатів вимірювань датчиків фізичних величин бездротовим каналом;

– збільшити площі та кількість контрольованих об'єктів за рахунок великої кількості каналів передачі;

– збільшити продуктивність системи за рахунок великої швидкості передачі даних.

3. Побудова системи на основі вимірювальних модулів PXI компанії National Instruments, які мають високу продуктивність, забезпечує можливість роботи в режимі реального часу, реєстрацію даних при багатоканальних вимірах електричних сигналів, що характеризуються широкими динамічними та частотними діапазонами, складною формою та високою точністю вимірювань, а також легкість керування великою кількістю датчиків.

4. Метрологічний діагностичний самоконтроль, що реалізується за рахунок вхідних до складу системи цифрових датчиків та спеціального програмно-алгоритмічного забезпечення, забезпечує самодіагностику стану системи, підвищуючи надалі надійність та достовірність діагностики стану двигуна

5. Застосування та розробка нових цифрових датчиків дозволяють отримати повну та достовірну інформацію про технічний стан двигуна.

Нано-сенсорна нейроподібна система "Електронний ніс" включає такі компоненти :

- систему повітропровід для доставки газової проби з аналізованого повітряного об'єму до сенсорної матриці.;

- матрицю високочутливих напівпровідникових детекторів - аналізаторів складу газової фази;

- аналоговий перетворювач вихідного сигналу сенсорів у цифровий код АЦП Е-24. Його характеристики: вісім каналів (одночасно працюють чотири канали); тип/розрядність АЦП сигма-дельта АЦП AD 7714/24 біта; діапазон вхідного сигналу $\pm 2,5$ (програмно встановлюваний коефіцієнт посилення від 1 до 128); частота перетворення, максимальна, 1 кГц; споживання не більше 4 мА (живлення від СОМ-порту при підключенні до порту RS-232, у якого відсутнє двополярне живлення, для роботи з модулем знадобиться зовнішній блок живлення +12 В); габарити 122×70×28 мм;

Термометри опору, що встановлюються в даний час на агрегатах двигуна, що відрізняються високою вібронпруженістю, не забезпечують вимоги щодо вібраційних впливів. В даний час є всі підстави та гарантований заділ для створення нового аналога, але з габаритними розмірами, що відповідають термопарам ТТ135 та ТТ142.

6. Широкий набір функцій обробки даних про параметри або діяльність рухової установки дозволяє отримувати різноманітну спеціальну обробку, що пройшла інформацію, необхідну щодо розширеного аналізу технічного стану двигуна.

7. Дружній інтерфейс відображення інформації забезпечує обслуговуючий персонал найбільш повною інформацією про параметри або діяльність рухової установки.

8. WiFi-роутер для передачі даних по швидкісній.

9. Sd карта для зберігання давних вимірювань і еталонних показників та на випадок перебою зв'язку з інтернетом.

Для обробки даних які надходять від датчиків використовуємо блоки нейронної мережі прямого поширення (НЕП). Якщо є збіг, то для кожної групи інформаційних ознак tn отримуємо макрошар, що містить нейрону мережу з макрошарами (НММ) в залежності від кількості збігів. Так, як рішення приймається завдяки наявності інформації про дефекти в кожному з наявних N слоїв НСМ, тоді вона повинна містити $N+1$ шар. Де вихідний шар призначений для керування рішеннями в кожному наступному. Структурна схема нейронної мережі показана на Рис. 4.

Рис. 4. Структурна схема нейронної мережі з макрошарами для інтелектуальної мультисенсорної системи для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання. Кожна НМС налаштовується за алгоритмом зворотного поширення помилки. Спочатку налаштовуються нейронні мережі першого шару. Потім вже вихідний шар. Для роботи НМ необхідна база даних, у якій виділено три блоки: - база даних; - база моделей нейронних мереж ; - база навчальних вибірок. База даних містить інформацію про стандарти концентрації речовин в повітрі, які необхідно аналізувати та призначені для формування навчальних вибірок.

Висновок

Розроблена система значно перевершує аналоги за максимальною кількістю аналогових та цифрових вимірювальних каналів та цифрових датчиків, що дозволить проводити комплексну автоматизацію процесів тестування електроприводу, знизити кількість відмов, що припадають на рухові установки з рідинними двигунами, скоротити масштаб руйнувань, розширити можливості аналізу стану

обладнання без необхідності відключення та збереження конструкцій установки. Завдяки максимально компактним розмірам установки, маємо можливість проводити виміри в важко доступних місцях, без виводу обладнання з роботи, що мінімізує втрати від простою. Також використання даної системи дозволяє виявити розвиток дефекту на ранніх стадіях розвитку, що перешкоджає і значно зменшує вартість ремонту енергетичного обладнання при виході з справного стану.

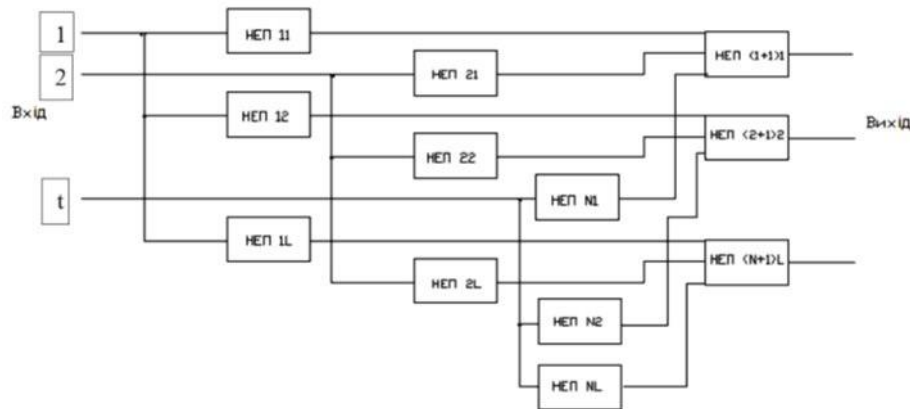


Рисунок 4 - Структурна схема нейронної мережі з макрошарами

Список використаної літератури.

1. Denysiuk S. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management //EUREKA: Physics and Engineering(2). – 2021. – С. 19-31.
2. Зайченко С. Зменшення ступені невизначеності технічного стану автономного джерела живлення/ С. Зайченко, Р. Куліш// Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.-прак. конф., 5-7 квіт. 2021 р. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ Том 1, С. 175-178.
3. Zaichenko S. Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2020. – С. 305-308.
4. Zaichenko S. Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2020. – С. 262-265.
5. Zaichenko S. Substantiation of diagnostic parameters of autonomous sources of electric energy on the basis of the internal combustion engine at development of system of technical diagnostics // POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. – 2020. – №. 3. – С. 29-34.
6. Saraoğlu H. M. Elektronik burun teknolojisi ve uygulama alanları. – 2008.
7. Saraoğlu H. M., A. O. Selvi, İnsan Nefesinden Kandaki Glikoz ve HbA1c Değerlerinin Elektronik Burun Kullanılarak Belirlenmesi, 18. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (BİYOMUT 2014)
8. Saraoğlu H. M. ve Koçan M., “Diyabetli Kan Glukoz değerinin Nefes Kokusundan QCM Sensör Tabanlı Elektronik Burun Kullanılarak Belirlenmesi”, 15. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı (BİYOMUT 2010)
9. Saraoğlu H. M., Selvi A. O. Determination of glucose and HbA1c values in blood from human breath by using radial basis function neural network via electronic nose //2014 18th National Biomedical Engineering Meeting. – IEEE, 2014. – С. 1-4.
10. Зайченко С., Жукова Н., Яковлев Д., Шаленко В., & Корнійчук Б. (2021). Інтелектуальна мультисенсорна система для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, (97), 62–67. URL: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0501>
11. Зайченко С., Яковлев Д. Інтелектуальна мультисенсорна система для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання. XIV науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» м. Київ, 2022 р. С. 160–163. URL: <https://en.iee.kpi.ua/files/2022/dopovidi2022.pdf>
12. Зайченко С., Яковлев Д. Інтелектуальна мультисенсорна система для ідентифікації та оцінки технічного стану електротехнічного обладнання. Інтелект молоді. Рациональне природокористування та новітні енергоефективні технології, м. Київ, 2022 р. С.57-58 URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50157>

D. Yakovlev¹, Ph. D student, ORCID 0000-0002-8176-6627

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

AN INTELLIGENT MULTI-SENSOR SYSTEM FOR IDENTIFICATION AND ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING WI-FI

The modern stage of industrial development is characterized by an increasing need for systems to monitor the condition and efficient functioning of electrical equipment. Breakdown or unplanned stoppage of an

electromechanical system engine is accompanied by significant economic losses for enterprises. Therefore, the current stage of industrial development is characterized by an increasing need for systems for monitoring the condition and efficient functioning of electrical equipment.

As a result, due to the rapid development of precision manufacturing technologies, many studies have been conducted in the field of multi-sensor measurement and data fusion technologies to improve monitoring capabilities in terms of measurement accuracy and information richness, thereby increasing production efficiency and accuracy. In a multi-sensor system, each sensor independently measures certain parameters. The system then uses an appropriate signal processing algorithm to combine all the independent measurements into a complete set of measurement results.

An accurate assessment of the technical condition makes it possible to predict the term of the next repair of the equipment, increases the reliability and efficiency of its operation, reduces the damage from downtime of the equipment due to accidents, the costs of repair and restoration of operability, reduces the costs of maintenance and operation of the equipment.

This article presents an overview of an intelligent multi-sensor system for monitoring the process and technological state of electrical equipment. Which in real time with the help of sensors makes it possible to obtain information from the environment and draw conclusions about the condition of the diagnosed equipment. The technology of an intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment has prospects for wide application in industries. Thanks to the most compact dimensions of the installation, we have the opportunity to take measurements in hard-to-reach places, without removing the equipment from work, which minimizes losses from downtime. Also, the use of this system allows detecting the development of a defect in the early stages of development, which prevents and significantly reduces the cost of repairing power equipment when it is out of service.

Keywords: *energy source, autonomous power supply, multi-sensor system, assessment of technical condition, intelligent system, remote diagnostics.*

References

1. Denysiuk S. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management //EUREKA: Physics and Engineering(2). – 2021. – P. 19-31.
2. Zaichenko S. Reducing the degree of uncertainty of the technical state of an autonomous power source/ S. Zaichenko, R. Kulish// Applied scientific and technical research: materials of the V International. science-practice conference, April 5-7 2021 - Academy of Technical Sciences of Ukraine. - Ivano-Frankivsk Volume 1, pp. 175-178.
3. Zaichenko S. Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). - IEEE, 2020. - P. 305-308.
4. Zaichenko S. Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). - IEEE, 2020. - P. 262-265.
5. Zaichenko S. Substantiation of diagnostic parameters of autonomous sources of electric energy on the basis of the internal combustion engine at development of system of technical diagnostics // POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. – 2020. – no. 3. – P. 29-34.
6. Saraoğlu H. M. Electronic technology and applications. - 2008.
7. Saraoğlu H. M., A. O. Selvi, İnsan Nefesinden Kandaki Glikoz ve HbA1c Değerlerinin Elektronik Burun Kullanılarak Belirlenmesi, 18. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Topulması (BİYOMUT 2014)
8. Saraoğlu H. M. and Koçan M., "Diyabetli Kan Glukoz geritinin Nefes Kokusundan QCM Sensör Tabanlı Elektronik Burun Kullanılarak Belirlenmesi", 15. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Topulması (BİYOMUT 2010)
9. Saraoğlu H. M., Selvi A. O. Determination of glucose and HbA1c values in blood from human breath by using radial basis function neural network via electronic nose //2014 18th National Biomedical Engineering Meeting. - IEEE, 2014. - P. 1-4.
10. Zaichenko S., Zhukova N., Yakovlev D., Shalenko V., & Korniyuchuk B. (2021). An intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment. Mining, construction, road and reclamation machines, (97), 62–67. URL: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0501>
11. Zaichenko S., Yakovlev D. Intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment. XIV scientific and technical conference "Energy. Ecology. Human" Kyiv, 2022, pp. 160–163. URL: <https://en.iee.kpi.ua/files/2022/dopovid2022.pdf>
12. Zaichenko S., Yakovlev D. Intelligent multi-sensor system for identification and assessment of the technical condition of electrical equipment. The intelligence of youth. Rational use of nature and the latest energy-efficient technologies, Kyiv, 2022. P.57-58 URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50157>

Надійшла: 18.09.2023

Received: 18.09.2023

НЕЛІНІЙНА МОДЕЛЬ РЕКУПЕРАТИВНОГО АМОРТИЗАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ

В даній статті досліджена нелінійна модель рекуперативного амортизаційного пристрою динамічної системи та проведена оцінка ефективності перетворення механічної енергії коливань в електричну. Розглянуто актуальні тенденції рекуперації енергії в будівельній та транспортній галузі. Особливу увагу приділено рекуперації енергії гідродарного пристрою з використанням прямого та зворотного п'єзо ефекту. В статті наведено результати формування та дослідження нелінійної моделі амортизаційного гідродарного пристрою. Обґрунтовано інтегрування нелінійного диференціального рівняння за допомогою методу Рунге-Кутта в системі Mathcad з побудовою графіків параболічної залежності зведеної жорсткості динамічної системи від амплітуди коливань. Встановлені залежності кінематичних та енергетичних параметрів коливального процесу від реакції віддачі та визначений рівень потужності коливального процесу, частину якої доцільно перетворити в електричну енергію за допомогою п'єзогенератора. Розглянута науково-технічна проблема, яка, полягає в визначенні характеру негативного впливу зовнішніх збурень різного виду на функціонування гідродарного пристрою. Оцінено проблеми забезпечення, в процесі рекуперації, стабілізації динамічних процесів та визначення їх раціональних параметрів. Доведено, що вибір параметрів пружних елементів доцільний з урахуванням рекомендацій з використання пружних елементів з симетричною нелінійною характеристикою, жорсткість яких прогресивно збільшується при відхиленнях від точки статичної рівноваги. Запропоновано рішення, коли рекуперативний амортизаційний пристрій динамічного робочого органу є частиною комплексу, де втрачається значна кількість енергії, що спричинено тертям та розсіюванням енергії у вигляді тепла, і тому саме таку енергію розсіювання доцільно перетворювати в електричну.

В наведеній роботі проаналізовано використання різних типів п'єзокерамічних перетворювачів, в різних системах динамічних коливань та збурень, та обґрунтована ефективність їх запровадження в конструкції п'єзогенераторів для ефективної рекуперації енергії.

Ключові слова: нелінійна модель, числові методи, рекуперація, амортизаційний пристрій, гідромолот, потужність, коливання, п'єзогенератор.

Вступ

На сьогодні підвищення енергоефективності, досягнення автономності джерел енергії в промисловості є актуальною задачею.

Зазвичай енергія механічних коливань часто марно втрачається в перехідних елементах, ресорах, амортизаторах, гасниках коливань технічних засобів. Так в секторі будівельної та гірничої техніки широке застосування знайшли імпульсні виконавчі органи, які руйнують гірські породи та міцні ґрунти, але їх застосування викликає реакцію віддачі та шкідливу вібрацію [1]. В секторі експлуатації транспортних засобів виникнення вібрації та її демпфювання пов'язане з дисипацією енергії вібрації в амортизаторах та її перетворення в тепло. Тому, наприклад, останнім часом ряд провідних транспортнобудівних компаній світу проводять дослідження та розробляють системи електромеханічного перетворення енергії механічних коливань [2-4], в електричну енергію. Наявність систем рекуперації механічної енергії коливань забезпечує економію палива двигуна і розширює функціональні можливості машин за рахунок появи додаткового джерела електроживлення.

Отже є актуальним розвивати технології рекуперації енергії, яка інакше була б втрачена, і таким чином підвищуючи загальну ефективність використання енергії. З іншого боку, застосування систем рекуперації можуть негативно впливати на основне призначення і основний технологічний процес, що може призвести до дестабілізації динамічної системи, підвищення коефіцієнту динамічності та, відповідно, зниження надійності системи.

Проблема забезпечення, в процесі рекуперації, стабілізації динамічних процесів та визначення їх раціональних параметрів полягає в розробці ефективних математичних моделей з використанням аналітичних та числових методів для пошуку розв'язків початкових задач з нелінійними характеристиками жорсткості та в'язкості.

В імпульсних виконавчих органах гірничих машин та пристроях їх подачі, амортизаторах транспортних засобів, характеристики жорсткості та дисипації частіше істотно нелінійні. Головна особливість істотно нелінійних систем полягає в тому, що до них не можна використати принцип

суперпозиції, а форма й показники перехідного процесу залежать від величини й форми зовнішнього впливу, тому для розв'язку диференціальних рівнянь їх руху доцільно застосовувати числові методи інтегрування [5].

Мета та завдання

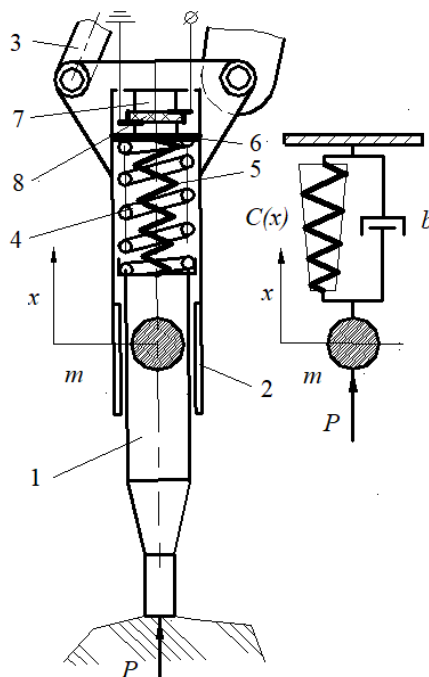
Метою цього дослідження є розробка нелінійної моделі амортизаційного пристрою динамічної системи та обґрунтування параметрів рекуперації механічної енергії, з перетворенням її в електричну з використанням п'єзоелектричного генератора, який встановлений безпосередньо в конструкції амортизатора динамічного пристрою.

Задачами є: формування математичної моделі на основі нелінійного диференціального рівняння системи амортизації корпусу гідромолота встановленого на маніпуляторі гідравлічного екскаватора; застосування числового методу інтегрування нелінійного диференціального рівняння в системі Mathcad; обґрунтування силової характеристики амортизатора у вигляді кубічної параболи; визначення характеристик коливального процесу та енергії коливань амортизатора; аналіз параметрів та характеристик п'єзогенераторів та елементів п'єзокерамічних перетворювачів.

Матеріал і результати досліджень

В якості динамічної системи досліджувалась підвіска ударного пристрою на маніпуляторі, яка мала характеристики жорсткості та дисипації істотно нелінійні. Тоді дослідження динамічних процесів з істотно нелійними елементами доцільно проводити числовими методами, оскільки аналітичні методи використати досить проблематично, а в більшості й неможливо. Доведено, що використання числових методів (Рунге-Кутта та інших) достатньо ефективно для одномасових систем, для яких точний розв'язок знаходиться методом "склеювання" окремих попередньо лінеаризованих ділянок [6].

Розглянемо рекуперативний амортизаційний пристрій гідромолота з елементами пружно-дисипативного захисту маніпулятора, базової машини та оператора від коливань за умови лінійних та нелінійних пружних елементів з застосуванням в конструкції системи рекуперації з п'єзогенератором для перетворення енергії коливань в електричну енергію (рис 1). Вибір параметрів пружних елементів доцільний з урахуванням рекомендацій з використання пружних елементів з симетричною нелінійною характеристикою, жорсткість яких прогресивно збільшується при відхиленнях від точки статичної рівноваги [7].



1 – гідромолот; 2 – направляюча; 3 – елементи маніпулятора; 4, 5 – пружні елементи з жорсткостями відповідно лінійною – c_0 , нелінійною – $c_1 \cdot x^2$ в залежності від переміщення x , та коефіцієнтом затухання b в залежності від швидкості x' ; 6 – опорна плита; 7 – п'єзогенератор; 8 – п'єзоелемент

Рисунок 1 – Розрахункова схема та нелінійна модель елемента рекуперативного амортизаційного пристрою

Рекуперативний амортизаційний пристрій (рис.1) включає гідромолот 1, направляючу 2, яка кріпиться до елементів маніпулятора 3, два паралельно підімкнутих пружних елемента 4 і 5, які мають відповідно лінійну жорсткість c_0 та нелінійну жорсткість $c_1 \cdot x^2$, що в сукупності утворюють зведену жорсткість $C(x)=c_0+c_1 \cdot x^2$. Тоді нелінійна сила опору пружини характеризується кубічною характеристикою сили опору $N(x)=C(x) \cdot x=c_0 \cdot x+c_1 \cdot x^3$. Сила опору пружини навантажує плиту 6, а через неї п'єзогенератор 7 з п'єзоелементом 8.

Рівняння руху гідромолота масою m (без врахування вагових характеристик) за принципом Даламбера, запишеться:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + C(x) \cdot x = F(t), \quad (1)$$

де b – коефіцієнт затухання, Нс/м; m – зведена в динамічному відношенні маса гідромолота, кг;

$F(t)$ – реакція віддачі гідромолота, Н. При стабільному функціонуванні гідромолота допустима апроксимація $F(t)=P \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$, де P – максимальна амплітуда реакції віддачі, Н; ω – частота коливань, рад/с; φ_0 – початкова фаза, рад. Для гідромолота з енергією удару 360 Дж, призначеного для монтажу на прохідницькому щиті для руйнування твердих гірських порід, щільних ґрунтів та валунів [9] зазначені параметри приймають значення: $m=65$ кг; $c_0=1,5 \cdot 10^4$ Н/м; коефіцієнт $c_1=1,5 \cdot 10^7$ Н/м³. В процесі розгону бойка на корпус гідромолота діє сила віддачі від поршневого пневмоакумулятора з діаметром поршня $d = 0.08$ м, з тиском в камері акумулятора (в середньому) $p_a = 1,1$ МПа. Тоді максимальна амплітуда реакції віддачі складає $P=2,16 \cdot 10^3$ Н. При роботі гідромолота з лінійною частотою $f = 5$ Гц, кругова частота складає $\omega=31,416$ рад/с, приймається $\varphi_0=0$.

На рис.2 наведені характеристики складових зведеної жорсткості та сила опору $N(x)$.

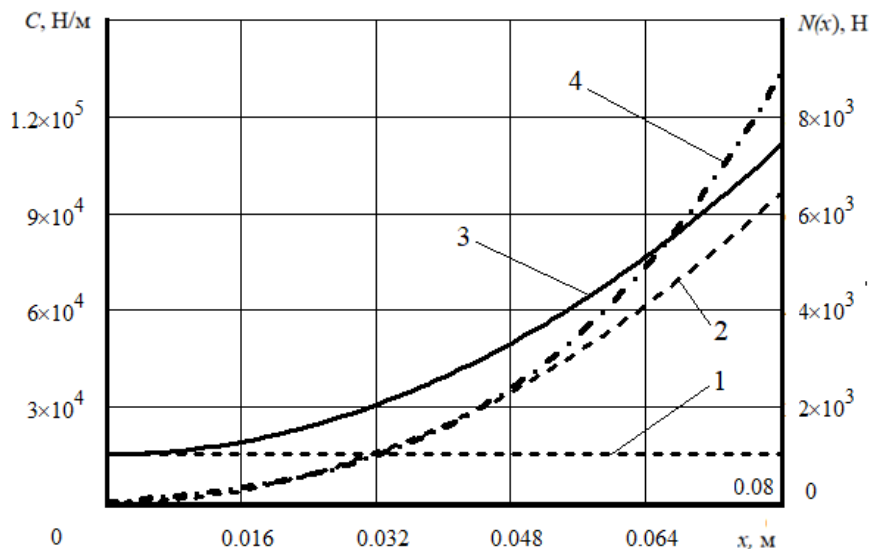


Рисунок 2 – характеристики: 1, 2 – відповідно складові жорсткості $c_0 = 1,5 \cdot 10^4$ Н/м, $c_1 \cdot x^2$, де коефіцієнт $c_1 = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м³; 3 – квадратична характеристика зведеної жорсткості $C(x)$; 4 – кубічна характеристика сили опору $N(x)$

Рівняння другого порядку (1) зводиться до двох рівнянь першого порядку

$$\frac{dx}{dt} = X_1, \quad (2)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = -\frac{b}{m} \cdot X_1 - \frac{C(X_0)}{m} \cdot X_0 + \frac{F(t)}{m}.$$

Початкові дані для розрахунків в Mathcad: $P=3,595 \cdot 10^4$ Н; максимальне відхилення, яке допустиме в конструкції для стиснення п'єзоелементів, $x_0=0,08$ м; початкова швидкість $v_0=0$; $m=65$ кг; $\omega=31,416$ рад/с; зведена жорсткість характеризується коефіцієнтами

$$c = \begin{pmatrix} 1,5 \cdot 10^4 \\ 1,5 \cdot 10^7 \end{pmatrix},$$

та крайовими умовами: допустиме пружними елементами максимальне переміщення корпусу гідромолота 0,08 м, та початкова швидкість дорівнює нулю, тобто:

$$X_0 = \begin{pmatrix} 0,08 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Праві частини системи (2) утворюють функцію:

$$F(t) = \left[\begin{matrix} X_1 \\ -\frac{b}{m} \cdot X_1 + \frac{-C(X_0)}{m} \cdot X_0 + \frac{P}{m} \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{matrix} \right], \quad (3)$$

З параметрами обчислення: за часом в межах до 1 секунди, тобто $t_0=0$, $t_N=1$ з числом ітерацій $N=10000$.

Наближений розв'язок методом Рунге-Кутта реалізується в Mathcad за допомогою функції Rkadapt() у вигляді

$$Z(t, X) = \text{Rkadapt}(X_0, t_0, t_N, N, F).$$

Перетворення в природну форму фізичних величин заміною змінних запишеться:

$$t = Z^{(0)}; \quad X = Z^{(1)}; \quad Y = Z^{(2)}, \quad (4)$$

де t – час, X – переміщення (x , м), Y – швидкість (v , м/с).

На рис.3 наведені графіки залежностей від часу переміщень та швидкості зведеної маси - маси гідромолота.

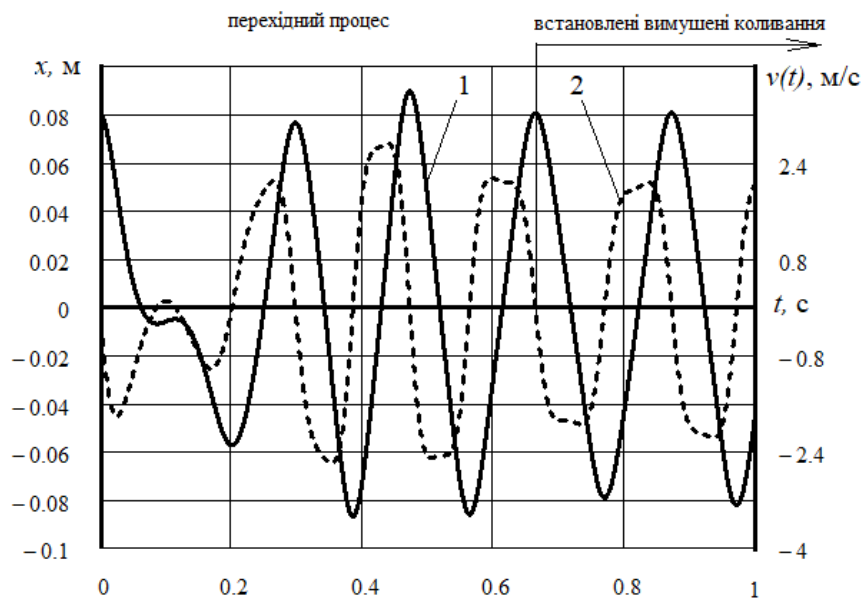


Рисунок 3 – Графіки залежностей від часу: 1 – переміщення, 2 – швидкості зведеної маси

Відповідно кінетична енергія зведеної маси та потенціальна енергія визначиться $T(t) = m \cdot Y^2/2$; $W(t) = X^2 \cdot C(0,04)/2$; де $C(0,04)$ – прийняте для оцінки енергетичного рівня усереднене значення зведеної жорсткості.

Повна енергія коливального процесу від дії реакція віддачі складе $E(T) = T(t) + W(t)$.

На рис.4 наведені енергетичні характеристики коливального процесу в межах часу одна секунда.

Виходячи з значення усередненого значення енергії $E_c = 170$ Дж з урахуванням частоти установлених коливань $f = 5$ Гц в межах часу $t = 1$ с, можна оцінити потужність, частину якої можливо за допомогою установки п'єзогенератора перетворити на електричний струм. Така потужність визначиться приблизною залежністю $U = E_c \cdot f/t$, і в межах однієї секунди складе 850 Вт, а в межах однієї години складе відповідно 3060 кВт, що підтверджує очевидну ефективність застосування п'єзогенераторів.

Рекуперативний амортизаційний пристрій динамічного робочого органу є частиною комплексу, де втрачається значна кількість енергії, що спричинено тертям та розсіюванням енергії у вигляді тепла, і тому саме таку енергію розсіювання доцільно перетворювати в електричну, за допомогою п'єзогенератора, який базується на п'єзоелектричних матеріалах. Основною перевагою п'єзоелектричних матеріалів для

отримання енергії (порівняно з іншими перетворювачами енергії) є велика питома потужність, яку можна отримати за їх допомогою, а також простота використання [8].

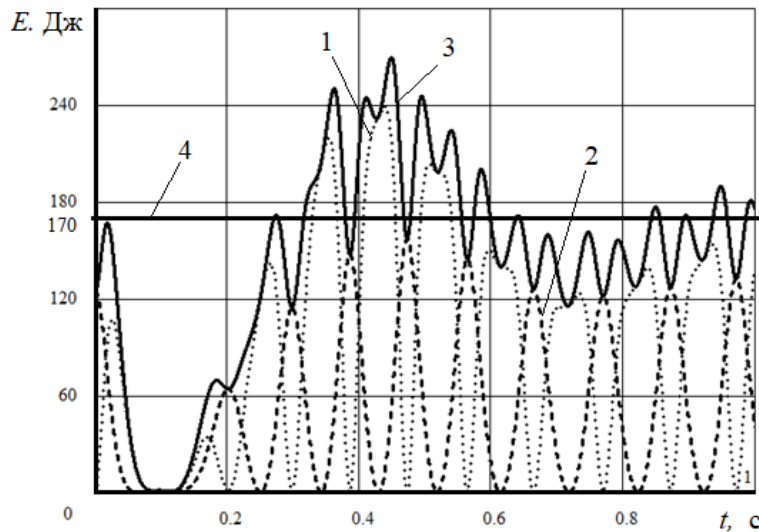


Рисунок 4 – Графіки залежностей від часу: 1 – кінетичної енергії, 2 – потенціальної енергії, 3 – сумарної енергії коливального процесу, 4 – усереднене значення максимальних амплітуд енергії з урахуванням встановленого процесу вимушених коливань

П'єзоелектричні матеріали мають властивість анізотропності, тобто властивості матеріалу залежать від напрямку сил і орієнтації електродів поляризації. П'єзоелектричний ефект перетворює механічний тиск в електричний струм або напругу [9].

В роботі [10] розглянута система збору електричної енергії на основі п'єзокерамічних перетворювачів, який складається з випрямляча, інвертора та понижувального перетворювача для зниження вихідної напруги до діапазону 0,...,3,3 В. За цих умов система збору електричної енергії генерує 244 мВт потужності з ефективністю 64%.

П'єзоелектричні приводи поділяються на низьковольтні та високовольтні. Для вибору п'єзокераміки з метою встановлення в рекуперативний амортизаційний пристрій варто порівняння матеріал та розміри, електричні властивості, температурних діапазонів та інші фізичні властивості. Виготовлення прототипів приводів нестандартних розмірів і продуктивності для елементів високої напруги набагато простіше, ніж для елементів низької напруги, і всі види п'єзокераміки можуть бути використані. Низьковольтні елементи використовують більшу кількість тонших активних шарів порівняно з високовольтними елементами, щоб отримати таку саму довжину активного стека. Це призводить до еквівалентно більшої електричної ємності.

В роботі [11] було проведено дослідження під час якого було досліджено матеріал PZT: PZT-4, PZT-8, PZT-5H. Зразки у дослідженні склалися з: чотирьох елементів PZT-матеріалу з пошаровою структурою паралельного з'єднання. Наведено результати залежності напруги на виході від частоти навантаження при величинах навантаження 300, 500, 1000 Н, які наведені у табл. 1, що є характерним для моделі (рис. 1) та отриманих характеристик (рис. 2, 3).

З таблиці видно що напруга матеріалу PZT залежить від частоти навантаження, від 1 Гц до 5 Гц напруга значно зростає, від 5 Гц до 10 Гц напруга зростає повільніше. Основним параметром матеріалу PZT є п'єзоелектричний модуль, який визначає рівень генерованої енергії.

Висновки

1. Амортизаційні пристрої, які встановлені для гасіння коливань, споживають велику кількість механічної енергії, перетворюючи її в тепло, що розсіюється в атмосферу. Таку енергію, без зниження ефективності функціонування, доцільно використовувати, шляхом застосування п'єзогенераторів, з застосуванням п'єзокераміки, для перетворення механічної енергії в електричну.

2. Запропоновано рекуперативний амортизаційний пристрій гідромолота з елементами пружно-дисипативного захисту маніпулятора, базової машини та оператора від коливань за умови лінійних та нелінійних пружних елементів з застосуванням в конструкції системи рекуперації з п'єзогенератором для перетворення енергії коливань в електричну енергію. Рекуперативний амортизаційний пристрій включає гідромолот, направляючу, яка кріпиться до елементів маніпулятора, два паралельно підімкнутих пружних елемента, які мають характеристику зведеної жорсткості у вигляді квадратичної параболи, а нелінійна сила опору пружних елементів характеризується кубічною характеристикою сили опору, яка відповідає вимогам оптимального віброзахисту обладнання.

Таблиця 1 – Напруга в режимі пікового навантаження 300 Н, 500 Н, 1000 Н

Тип	Частота, Гц	Напруга, В	Навантаження, Н
PZT-4	1	9,5	300
PZT-8		7,6	
PZT-5H		5	
PZT-4	5	14,5	
PZT-8		14	
PZT-5H		17	
PZT-4	10	15	
PZT-8		14,8	
PZT-5H		22	
PZT-4	1	15,1	500
PZT-8		12	
PZT-5H		19,5	
PZT-4	5	23	
PZT-8		23	
PZT-5H		27	
PZT-4	10	24,5	
PZT-8		24,5	
PZT-5H		36	
PZT-4	1	31	1000
PZT-8		25	
PZT-5H		17	
PZT-4	5	49	
PZT-8		47	
PZT-5H		57	
PZT-4	10	49,5	
PZT-8		49	
PZT-5H		70	

3. Запропонована методика інтегрування нелінійного диференціального рівняння руху гідромолота при дії реакції віддачі та встановлені кінематичні і енергетичні параметри рекуперативного амортизаційного пристрою. Виходячи з усередненого значення енергії віддачі 170 Дж, з урахуванням частоти установлених коливань 5 Гц, в межах часу 0,...,1 с, обґрунтована оцінка потужності в межах однієї години в 3060 кВт, частину якої можливо, за допомогою установки п'езогенератора, перетворити на електричний струм, що підтверджує очевидну ефективність застосування п'езогенераторів.

4. Наведені рекомендації по вибору елементів п'езогенератора в межах силових характеристик 300,...,1000 Н, з частотою 1, ...,10 Гц з можливістю генерації напруги 5,...70 В.

Список використаної літератури

1. Сліденко В.М. Шевчук С.П. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2010. 192 с.;
2. Міжнародне енергетичне агентство. Світовий енергетичний огляд 2022. IEA Publications, 2022. 522 с. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary> (дата звернення: 18.06.2023).;
3. МакКеррачер К. Огляд електромобілів 2022. BloombergNEF. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (дата звернення: 20.07.2023).;
4. Міжнародне енергетичне агентство. Вступаємо в десятиліття електроприводу?. IEA Publications, 2020. 273 с. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (дата звернення: 20.07.2023).
5. Сліденко А. М., Сліденко В. М. Models of hysteresis oscillation damping at pulse loadings. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1479. С. 012098. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012098> (дата звернення: 21.07.2023);
6. Сліденко А. М., Сліденко В. М. The research of discrete and continuous models of impact devices by numerical methods. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 1902, № 1. С. 012024. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012024> (дата звернення: 21.07.2023);
7. Сліденко В. М., Сліденко О. М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин : монографія. Київ : Політехніка, 2018. 220 с.;
8. Безвесільна О. М. Перетворювачі фізичних величин. Технічні засоби автоматизації : підручник. Житомир : НПО «Пріоритети», 2019. 809 с.;
9. Васьковський Ю. М., Пода М. В. Оцінка енергетичної ефективності систем рекуперативної енергії механічних. Коливань транспортних засобів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2020. № 3 (1357). С. 52–55. URL: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.09> (дата звернення: 23.07.2023);

10. Халілі М., Ахмед С., Папагіаннакіс А. Використання п'єзоелектричної енергії для живлення нової системи зважування в русі. *Energy conversion and management*. 2022. № 15. С. 100259.

11. Ceramic Materials (PZT) – Boston Piezo-Optics Inc. *Boston Piezo-Optics Inc.* URL: <https://www.bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt> (дата звернення: 25.07.2023).;

A. Novykov¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-7597-3013

V. Slidenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-9313-331X

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

NON-LINEAR MODEL OF A RECUPERATIVE SHOCK ABSORBER

This article examines the rationale for using a shock absorber with the function of recuperating mechanical energy into electrical energy. Current trends in the transport industry, regarding the need to use autonomous power sources in the transport infrastructure, are considered. This direction is promising due to the replacement of vehicles with internal combustion engines by electric transport, as well as the need for autonomous power supply of individual nodes and aggregates. The need for autonomy emerges acutely in the conditions of the energy crisis, and at the same time, the lack of energy resources. Special attention is paid to energy recovery using the direct and converse piezoelectric effect. The structure, chemical and physical properties, principle of operation and practical application of piezoceramic transducers, and the possibility of their use as energy harvesters (generators) are considered. The considered scientific and technical problem, which consists in determining the nature of the negative impact of various types of external oscillations on the functioning of structural elements of vehicles, to reduce which various shock absorbers or dampers are used. This work considers the use of a recuperative shock absorber of vibration loads with the use of a piezoelectric energy harvester as a converter of mechanical energy of vibrations into electrical energy. Piezoceramic inserts are used as an energy collector in the design of an automobile hydraulic shock absorber. An assessment of the efficiency of recuperation and conclusions regarding the feasibility of use and implementation are provided. The shock absorbers which are installed to absorb vibrations consume a large amount of mechanical energy, converting it into heat which is dissipated into the atmosphere. This energy, without reducing the efficiency of functioning, can be beneficially used by using a piezoelectric generator with piezoelectric ceramics to convert mechanical energy into electrical energy.

Keywords: non-linear model, numerical methods, recovery, shock absorbing device, hydraulic hammer, power, vibrations, piezoelectric generator.

References

1. V. M. Slidenko and S. P. Shevchuk, Stabilising the operation of a mining machine with a pulse actuator. Kyiv: NTUU "KPI", 2010;

2. International Energy Agency, "World Energy Outlook 2022", IEA Publications, Paris, World Energy Outlook 2022, Oct. 2022. Accessed: June 18, 2023 [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary>;

3. C. McKerracher. "EVO Report 2022 | BloombergNEF | Bloomberg Finance LP." BloombergNEF. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (accessed July 20, 2023);

4. International Energy Agency, "Entering the decade of electric drive?", IEA Publications, Paris, Global EV Outlook 2020, Jun. 2020. Accessed: July 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>;

5. A. M. Slidenko and V. M. Slidenko, "Models of hysteresis oscillation damping at pulse loadings", *J. Physics: Conf. Ser.*, S. 1479, P. 012098, March 2020. Accessed: July 21, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1479/1/012098>;

6. A. M. Slidenko and V. M. Slidenko, "The research of discrete and continuous models of impact devices by numerical methods", *J. Physics: Conf. Ser.*, S. 1902, № 1, P. 012024, May 2021. Accessed: July 21, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012024>;

7. A. M. Slidenko and V. M. Slidenko., Mathematical modelling of shock-wave processes of hydraulic pulse systems of mining machines: monograph. Kyiv: Polytechnic, 2018;

8. O. M. Bezvesilna, Converters of physical quantities. Technical facilities for automation. Zhytomyr: NGO "Priorities", 2019;

9. U. M. Vaskovskyi and M. V. Poda, "Energy efficiency assessment for energy recovery systems of mechanical vibrations of vehicles", *Bull. NTU "Kharkiv Polytech. Institute"*, № 3 (1357), P. 52–55, Feb. 2020. Accessed: July 23, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.09>;

10. M. Khalili, S. Ahmed and A. T. Papagiannakis, "Piezoelectric Energy Harvesting for Powering a Novel Weigh-in-Motion System", *Energy Conversion and Management*, X, P. 100259, June 2022. Accessed: July 25, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100259>;

11. "Ceramic Materials (PZT) - Boston Piezo-Optics Inc." Boston Piezo-Optics Inc. <https://www.bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt> (accessed July 25, 2023);

Надійшла: 23.08.2023

Received: 23.08.2023