

**Міністерство освіти і науки України  
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»  
Херсонський національний технічний університет  
Хмельницький національний університет**

## **МАТЕРІАЛИ**

**Десятої Всеукраїнської науково-практичної  
інтернет-конференції студентів, аспірантів і  
молодих вчених**

# **АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**



20 травня 2026 р.

м. Хмельницький, Херсонський національний технічний університет  
[http://kntu.net.ua/Conference\\_APME](http://kntu.net.ua/Conference_APME)

УДК 620.9

А 43

А 43 **Актуальні проблеми сучасної енергетики:** матеріали X Всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (20 травня 2026 р., м. Хмельницький) / за наук. ред. В.В. Курака, О.В. Андронової. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2026. – 213 с.

**ISBN 978-617-8187-81-1 (електронне видання)**

### **Організаційний комітет**

#### **Голова оргкомітету:**

Чепелюк Олена Валеріївна – д.т.н., професор, лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, ректор Херсонського національного технічного університету;

#### **Заступник голови оргкомітету:**

Курак В.В. – к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри енергетики, електротехніки і фізики, ХНТУ;

#### **Секретар оргкомітету:**

Андронова О.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики, ХНТУ;

#### **Члени оргкомітету:**

Неймак В.С. – к.т.н., доцент, завідувач кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем, ХНУ;

Дон Н.Л. – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики, ХНТУ;

Погребняк І.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики, ХНТУ;

Степанчиков Д.М. – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики, ХНТУ.

У матеріалах конференції викладені результати досліджень, які присвячені актуальним проблемам сучасної традиційної та альтернативної енергетики: питанням електроенергетики та теплоенергетики, дослідженню, впровадженню та оптимізації систем нетрадиційної та відновлюваної енергетики, енергозбереженню та автоматизації енергетичних процесів, а також їх економічним та екологічним аспектам.

Матеріали публікуються в авторській редакції. Відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, імен та інших відомостей, а також за наявність даних, які не підлягають відкритій публікації, несуть автори та наукові керівники опублікованих матеріалів.

Організацію та проведення конференції затверджено наказом по Херсонському національному технічному університету від 06.05.2026 № 125.

#### **Адреса організаційного комітету:**

Україна, 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,  
Херсонський національний технічний університет,  
кафедра енергетики, електротехніки і фізики

**УДК 620.9**

ISBN 978-617-8187-81-1 (електронне видання)

© Колектив авторів, 2026

© Кафедра енергетики, електротехніки і фізики ХНТУ, 2026

© Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2026

## ЗМІСТ

<b>СЕКЦІЯ 1. Електроенергетика</b>	10
Баженов В.А., Янковська О.М. Використання алгоритмів рішення транспортної задачі із проміжними перевезеннями для оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем	11
Тищенко В.Я., Грінченко В.С. Дослідження несинусоїдальності напруги в електричних мережах загальної призначеності	13
Майдан П.С., Соколан Ю.С., Кошелюк О.В. Проблематика компенсації реактивної потужності в енергосистемі	14
Онiпченко Р.С., Степанчиков Д.М. Методика розрахунку втрат потужності на загальну корону в лініях електропередачі надвисокої напруги	18
Шабров М.Ю. Від централізованої вразливості до розподіленої стійкості: модель Smart Grid + Microgrid для енергосистеми України	22
Денисенко Д.О., Колесник К.А., Степанчиков Д.М. Застосування принципу компенсації електромагнітного поля в повітряних лініях надвисокої напруги	26
Мінко О.М. Параметрична уніфікація електромеханічних перетворювачів енергії різних видів	30
Котенко Д.О., Степанчиков Д.М. Вплив кількості проводів у розщепленій фазі на втрати потужності в повітряних лініях надвисокої напруги	32
Агаджанов Г.Х., Курак В.В. Напрямки розвитку розподіленої генерації на Херсонщині	36
Хайнус М.В., Андропова О.В. Моделювання роботи літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей	38
<b>СЕКЦІЯ 2. Теплоенергетика</b>	40
Фатєєва К.О., Комендант С.Г. Методика розрахунку граничного часу мікрохвильового нагріву рослинного матеріалу в процесах комбінованої екстракції	41

<b>Pugachova T.M., Olizarenko V.O. Accumulation of damage in high-temperature elements of a turbine unit</b>	45
<b>Рашевський А.М., Круглякова О.В. Підходи до модернізації систем централізованого теплопостачання на основі низькопотенційних джерел теплоти</b>	46
<b>Соколовська І.Є., Біліченко К.В. Дослідження процесів отримання пористих матеріалів із заданими теплофізичними властивостями</b>	48
<b>Губін А.О., Клімов Р.О. Дослідження надійності роботи систем теплопостачання</b>	51
<b>Гречановський А.П., Тортіка Д.М., Борець С.О. Експериментальне дослідження сушіння цеолітів 13Х в мікрохвильовому полі</b>	52
<b>Романова К.О., Капустянський А.О., Правовеєров А.О. Аналіз режимів роботи енергетичного котла при спалюванні твердого палива</b>	55
<b>Куріленко С.В., Беднарська І.С. Підвищення енергоефективності котелень критичної інфраструктури шляхом утилізації вторинних енергоресурсів в умовах блекаутів</b>	58
<b>Pugachova T.M., Savoniuk M.V. Measures to improve the economic and operational performance of a power unit</b>	60
<b>Трубник А.О., Клімов Р.О. Приготування теплоносіїв для систем опалення на основі емульсій</b>	62
<b>Соколовська І.Є., Гончаров Я.Р. Модернізація вихрового апарату для обробки сировини</b>	63
<b>Нікульшин В.Ю., Шелешей Т.В. Роль захисного шару у забезпеченні довговічності теплоізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ 500 МВт</b>	67
<b>Крятов А.Г., Кравченко Є.О., Воробйов Н.О. Застосування енергії мікрохвильового поля у процесі спікання оксиду алюмінію на етапі сушіння</b>	69
<b>Беднарська І.С., Богдан А.О. Вплив експлуатаційних факторів на деградацію теплоізоляційних матеріалів енергетичного обладнання ТЕЦ</b>	72

<b>Koshelnik O.V., Kirsanov O.Yu., Ohrenchuk O.O. Analysis of phase-change materials for checkerwork in regenerative air heaters of glass-melting furnaces</b>	74
<b>Шелешей Т.В., Яценко С.С. Конструктивні особливості вузлів як фактор підвищеної деградації теплоізоляції енергетичного обладнання</b>	75
<b>Koshelnik O.V., Egorova O.Yu. Energy conversion complex for power and cooling generation</b>	77
<b>Шелешей Т.В., Лугвіна В.А. Аналіз структурної деградації волокнистих теплоізоляційних матеріалів в енергетичних установках</b>	78
<b>Соколовська І.Є., Цветков А.О. Дослідження кінетичних особливостей теплової обробки пористого теплоізоляційного матеріалу</b>	80
<b>Єрохін Д.М. Розробка зерносушарки з гібридною системою теплопостачання</b>	83
<b>Волчок В.О., Гусяков С.О., Єлохов Д.В. Експериментальне визначення теплових режимів напівпровідників</b>	87
<b>Беднарська І.С., Радченко А.Ю. Закономірності деградації теплової ізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ в умовах експлуатації</b>	90
<b>СЕКЦІЯ 3. Нетрадиційна та відновлювана енергетика</b>	92
<b>Матушкін Д.С. Формалізація моделі гібридної мікромережі з фотоелектричною генерацією та накопичувачем енергії за умов пріоритетного електропостачання</b>	93
<b>Петрик О.А., Жуков Р.О., Назаренко І.А. Дослідження ефективності використання сонячних трекерів в урбанізованих умовах</b>	97
<b>Курак В.В., Грисевич Р.І. Вираз для експрес-оцінки річного обсягу генерації електричної енергії вітроустановками</b>	100

<b>Тарасенко О.М., Чупріна Л.О. Вплив геометричних параметрів плоского геліоколектора на його ефективність</b>	103
<b>Дон Н.Л., Сухорука В.О., Корнієнко О.О. Розробка мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі»</b>	106
<b>Майдан П.С., Машовець Н.С., Коломієць Я.О. Проблематика використання енергії потоку рідини</b>	110
<b>Курак В.В., Качан В.А. Оцінка енергетичного потенціалу фасадної фотоелектричної станції на прикладі житлового будинку проєкту 111-94</b>	114
<b>Геймур В.О., Клімов Р.О. Моделювання роботи теплових насосів в децентралізованому теплопостачанні</b>	116
<b>Корнієнко О.О., Шаповал А.О., Дон Н.Л. Моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції дахового типу для КП «Дніпровський»</b>	117
<b>Панфілов А.І., Івченко В.В. Математичне моделювання та імітаційне дослідження генератора вітрової турбіни з удосконаленою стратегією відстеження точки максимальної потужності</b>	120
<b>Харченко Є.С., Погребняк І.Ф. Розробка біогазової установки з використанням електроенергії від ФЕС</b>	123
<b>Ніколенко С.В., Плотніков О.О., Андронova О.В. Моделювання роботи вітро-сонячної системи в програмному середовищі SAM</b>	125
<b>Кривоzub Д.Т. Перспективи використання відновлюваних джерел енергії в Україні в умовах енергетичної кризи</b>	127
<b>Загайнава О.А., Попенко К.П., Германчук Д.Д. Оптимізація пропускної спроможності перетинів енергосистем в умовах інтеграції відновлювальних джерел енергії</b>	129
<b>СЕКЦІЯ 4. Енергозбереження та автоматизація енергетичних процесів</b>	132
<b>Розен П.В., Розен В.П. Теоретичні аспекти оцінки стану енергоефективності промислового підприємства</b>	133

<b>Нерубацький В.П., Бувалін М.О., Лісков Д.І. Аналіз впливу застосування багаторівневих інверторів та сучасних систем керування на енергоефективність і надійність тягових електроприводів локомотивів</b>	137
<b>Гуцол О.О., Куляпін Д.В. Застосування методів теорії автоматичного керування для підвищення ефективності сонячних систем</b>	141
<b>Оробей В.В. Застосування функції Міттаг-Леффлера для моделювання теплопереносу в будівельних матеріалах</b>	145
<b>Кебус С.В., Засядьвовк Д.О., Русакова Т.І. Світлодіодне освітлення та датчики руху для енергозбереження в навчальних закладах</b>	147
<b>Дмитренко Є.В., Скрипка О.О. Вплив відхилення напруги на енергетичні характеристики вентиляційних установок</b>	150
<b>Гетманова Л.С. Дельта-функція Дірака в електротехнічних системах: Smart Grids, Smart Monitoring, Smart Home/City</b>	153
<b>Федоряка І.М., Клімов Р.О., Крюковська О.А. Використання теплових насосів при виробництві хімічних добрив</b>	155
<b>Сєліверстова С.Р., Пасечний Д.І. Проблеми експлуатації термодатчиків на суднових контейнеровозах та шляхи їх вирішення</b>	156
<b>Чумак С.С., Тельпук Є.В., Русакова Т.І. Роль відновлювальних джерел енергії у системі ресурсозбереження</b>	159
<b>СЕКЦІЯ 5. Економічні та екологічні аспекти енергозбереження</b>	163
<b>Івкіна Є.С., Кузнецов С.І. Нові каталізатори конверсії монооксиду карбону в теплоенергетиці</b>	164
<b>Овчаренко І.О., Беднарська І.С. Порівняльний аналіз первинних технологій зменшення викидів NO<sub>x</sub> при спалюванні мазуту</b>	167

<b>Кебус С.В. Аналіз можливостей удосконалення систем очистки димових газів на електростанціях України</b>	170
<b>Улаш Т.К., Шелешей Т.В. Аналіз кількості викидів оксидів вуглецю при спалюванні різних марок мазуту</b>	172
<b>Кирилів Б.В. Відновлювана енергетика як фактор стійкості та декарбонізації економіки України в умовах воєнного стану</b>	175
<b>Усов І.Л. Дослідження викидів діоксиду сірки при спалюванні вугілля залежно від складу палива</b>	179
<b>Лещенко І.Г., Лещенко О.В., Русакова Т.І. Екологічний слід електронного листа</b>	182
<b>Копанцев В.П., Шелешей Т.В. Дослідження кількості викидів оксидів вуглецю при спалюванні вугілля в залежності від складу палива</b>	185
<b>Романова К.О., У Цзунянь Аналіз енергетичної ефективності маловитратної модернізації пальникової системи котельного агрегату</b>	188
<b>Шапаренко Є.А., Беднарська І.С. Аналіз емісії оксидів азоту при спалюванні вугілля залежно від технології організації горіння</b>	191
<b>Семенюк О.П., Ганькова В.А. Аналіз екологічних аспектів енергозбереження як стратегічного напрямку сталого розвитку</b>	194
<b>Гранішевська А.Р., Сапон В.О., Беднарська І.С. Дослідження кількості викидів оксидів азоту <math>NO_x</math> в залежності від технології очищення димових газів при спалюванні мазуту</b>	196
<b>Царенко В.В., Сікорський А.А. Сучасні технології захисту водного середовища від антропогенного навантаження</b>	199
<b>Василенко В.А., Беднарська І.С. Стратегічні та екологічні аспекти впровадження систем утилізації тепла в умовах енергетичної кризи</b>	201
<b>Пивовар Б.Д. Переробка одноразових стаканів як спосіб збереження електроенергії</b>	203

<b>Антонюк Г.М., Беднарська І.С. Дослідження ефективності первинних методів зниження емісії NO<sub>x</sub> під час спалювання вугілля</b>	.....	205
<b>Осадчук Д.Д., Шелешей Т.В. Дослідження кількості викидів твердих частинок в залежності від технології спалювання вугілля</b>	.....	209
<b>Алфавітний покажчик авторів</b>	.....	211

# **Секція 1**

## **Електроенергетика**

УДК 621.311.1

## ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ РІШЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ ІЗ ПРОМІЖНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЕНЕРГОСИСТЕМ

К.т.н., доц. Баженов В.А., Янковська О.М.

*Національний технічний університет України**“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ*

v\_bazenov@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Баженов В.А.

Один з можливих шляхів вирішення загальної задачі оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем – її спрощення і приведення до відомих задач обчислювальної математики, для вирішення яких можуть бути застосовані стандартні математичні методи й алгоритми. При використанні методів лінійного програмування задача оптимізації розвитку електричних мереж повинна бути сформульована як задача відшукування мінімуму функції дисконтованих витрат на транспорт енергії від електростанцій до споживачів при наявності обмежень по балансу потужності у вузлах.

Розглянемо класичну постановку транспортної задачі. Нехай задані місця розташування електростанцій, кожна з яких генерує потужність  $a_i$ , де  $i = 1, 2, \dots, I$ . Крім того, задані навантажувальні пункти, потреба в потужності яких становить  $b_j$ , де  $j = 1, 2, \dots, J$ . Передбачається, що розглянутий раніше алгоритм рішення транспортної задачі може бути розповсюджений на випадок, коли допускається транспорт енергії не тільки від джерел до споживачів, а й безпосередньо між споживачами й між джерелами. Дана задача одержала назву транспортної задачі із проміжними перевезеннями й може бути сформульована як задача мінімізації функції

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

де  $i, j$  - поточні індекси вузлів мережі. У цьому випадку джерела й споживачі мають загальну нумерацію  $i, j = 1, 2, \dots, I$ . Задачу вирішують при наявності обмежень по балансу потужності у джерелах

$$\sum_i x_{ji} - x_{jj} = a_j \quad (2)$$

та у навантажувальних пунктах

$$\sum_i x_{ij} - x_{jj} = b_j, \quad (3)$$

де  $i$  – поточний індекс вузлів, безпосередньо пов'язаних з розглянутим  $j$ -м вузлом;  $x_{jj}$  – транзитна потужність. Коефіцієнти питомої вартості транспорту транзитної потужності виду  $C_{jj}$  ухвалюють рівними нулю.

Для джерел енергії транзитна потужність – це потужність, яка надходить у дане джерело від інших пунктів:  $x_{jj} = \sum_i x_{ij}$ . Для навантажувальних пунктів транзитна потужність дорівнює сумі потужності, які з розглянутого  $j$ -го пункту надходять до інших споживачів або джерел енергії:  $x_{jj} = \sum_i x_{ji}$ .

Для реалізації алгоритму вирішення задачі необхідно скласти транспортну матрицю, елементи якої являють собою потужності, що протікають по припустимих лініях зв'язку. Рядки транспортної матриці являють собою рівняння балансу потужності для електростанцій, а стовпці – рівняння балансу потужності для навантажувальних вузлів. Крім того, у клітках матриці записані питомі вартості передачі по припустимих зв'язках  $C_{ij}$ . Величини  $U_1, U_2$  і  $V_1, V_2, V_3$  одержали назву симплекс - множників.

Визначають клітку транспортної матриці з найменшим значенням питомої вартості транспорту енергії  $C_{ij}$ . Базисну перемінну  $x_{ij}$ , котра повинна бути записана в розглянуту клітку, знаходять з умови  $x_{ij} = \min\{a_i, b_j\}$ . Якщо  $a_i < b_j$ , замість значення  $a_i$  у відповідну клітку записують нуль, а  $b_j$  заміняють  $b_j - a_i$ . Крім того, в інші незаповнені клітки  $i$  - го рядка заносять нулі. Якщо  $b_j < a_i$ , у відповідну клітку матриці замість значення  $b_j$  записують нуль, замість  $a_i$  записують  $a_i - b_j$ , а інші незаповнені елементи  $j$  - го стовпця заміняють нулями. Далі знову вибирають незаповнену клітку з найменшим значенням  $C_{ij}$ , визначають базисну перемінну  $x_{ij}$ , знову порівнюють величини  $a_i$  й  $b_j$  і т.д. Процес закінчується тоді, коли будуть визначені значення  $x_{ij}$  для всіх кліток транспортної матриці.

Розглянутий алгоритм оптимізації розвитку електричних мереж великих систем енергетики реалізований у пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів. Розрахунки показали, що запропонований метод оптимізації відрізняється гарною збіжністю, досить стійкий до вибору початкових наближень.

#### Список літератури:

1. Баженов В.А. Моделювання електричної мережі при оптимізації розвитку енергосистем. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 5. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2006. – с. 9-12.
2. Кузнецов В.Г. Оптимизация режимов электрических сетей/ В.Г. Кузнецов, Ю.И. Тугай, В.А. Баженов. – Київ: Наукова думка, 1992. – 216 с.

УДК 621.31:64.06

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗАГАЛЬНОЇ ПРИЗНАЧЕНОСТІ

Тищенко В.Я., к.т.н., с.д. Грінченко В.С.

*Інститут загальної енергетики Національної академії наук України, м. Київ*  
dep3@ienergy.kiev.ua

Якість електричної енергії – це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів [1], які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням. Основні показники якості електроенергії включають відхилення напруги, частоти, несиметрію напруги, несинусоїдальність напруги та ін. Несинусоїдальність струму та напруги зумовлює додаткові втрати електроенергії, перевантаження та зниження пропускної здатності мережі, нагрів електрообладнання, зростання опору провідників і втрат в ізоляції, а також спричиняє збої в роботі пристроїв захисту. Ступінь несинусоїдальності напруги визначається коефіцієнтом гармонічних спотворень:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_{40}^2}}{U_1}, \quad (1)$$

де  $U_1$  – основна гармоніка напруги,  $U_2, U_3, \dots$  – вищі гармоніки.

Згідно [1] коефіцієнт гармонічних спотворень не має перевищувати 8 %.

У представлений роботі проведено експериментальне дослідження здатності побутових електричних приладів спричинити гармонічні спотворення синусоїди напруги в електричних мережах загальної призначеності. Для вимірювання активної потужності, реактивної потужності та коефіцієнта несинусоїдальності напруги THD використано вимірювальний прилад РМАС770 Multifunction Power Meter. Точність вимірювання активної та реактивної потужності становила 0,5 %, а коефіцієнта THD – 1,0 %. Загалом досліджено 29 різних побутових приладів, серед яких традиційні прилади з резистивним навантаженням (чайник, праска, фен та ін.) і сучасна побутова електроніка, що містить імпульсні перетворювачі енергії (телевізор, монітор, зарядні пристрої, джерела LED-освітлення та ін.).

Результати проведених вимірювань показали, що коефіцієнт THD знаходиться у межах від 1,08 % до 1,80 %. Відповідно, при одиночному використанні кожного з досліджених побутових приладів вимога стандарту [1] щодо граничного значення 8 % для коефіцієнта THD виконується.

### Список літератури:

1. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IKT). [Чинний від 2025-03-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024. 42 с.

УДК 621.316.1.016

## ПРОБЛЕМАТИКА КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

К.т.н., доц. Майдан П.С., к.т.н., доц. Соколан Ю.С., Кошелюк О.В.  
*Хмельницький національний університет, м. Хмельницький*  
maidanp@khnmu.edu.ua

Наприкінці ХХ століття науковці та інженери усвідомили важливість компенсації реактивної потужності (РП) для підвищення ефективності роботи електричних мереж, що стало поштовхом до розробки спеціалізованих компенсувальних пристроїв. З того часу в цій галузі досягнуто значного прогресу: створено пристрої з регульованими параметрами, які й досі вдосконалюються та модернізуються. Предметом аналізу є один із найновіших представників даного класу обладнання – безінерційний компенсатор реактивної потужності (БКРП) [1-5].

Незважаючи на те що БКРП наразі ще вважається інноваційним рішенням для енергетичних мереж, він вже сьогодні суттєво випереджає аналогічні пристрої як за технічними характеристиками, так і за економічною доцільністю впровадження [1-5].

Загально відомо, що електрична енергія (ЕЕ), що виробляється на електростанціях, має дві складові – активну та реактивну потужність. Активна потужність безпосередньо перетворюється споживачами на корисну роботу: теплову, механічну чи іншу. Реактивна ж потужність пов'язана з процесами накопичення та віддачі енергії в електричних і магнітних полях елементів мережі та обладнання. Такий безперервний обмін енергією між полями є невід'ємною частиною роботи будь-якої електричної системи.

Пристрої, що цілеспрямовано регулюють даний процес, отримали назву джерел реактивної потужності (ДРП) [1-5]. До них належать не лише генератори електростанцій, а й синхронні компенсатори, конденсаторні батареї та реактори, якими керують за спеціальними алгоритмами регулювання. Головна функція ДРП – підтримання балансу РП в енергосистемі шляхом регулювання обсягів її генерації або споживання. При цьому керування може здійснюватися як вручну, так і в автоматичному режимі – ступінчасто, плавно або комбінованим способом.

Універсальність ДРП як класу обладнання зумовлена здатністю керувати реактивною потужністю – одним із ключових параметрів режиму роботи електроенергетичної системи. Завдяки цьому ДРП виконують широкий спектр функцій у мережах рівня напруги 110 кВ і вище.

Зокрема, застосування дозволяє зменшити втрати активної потужності та загальні витрати ЕЕ в мережі, забезпечити стабілізацію рівня напруги у вузлах підключення споживачів, підвищити пропускну здатність ЛЕП, а також збільшити запаси як статичної, так і динамічної стійкості електропередач і генераторів. Крім того, ДРП ефективно використовуються для обмеження

перенапруг, що виникають у мережі внаслідок комутаційних процесів або атмосферних явищ [6, 8, 9].

У системах електропостачання промислових підприємств основним завданням ДРП є компенсація РП, що споживається потужними різкозмінними навантаженнями – наприклад, дуговими печами або зварювальним обладнанням, – а також вирівнювання несиметричного навантаження між фазами. У випадках, коли навантаження має нелінійний характер і генерує вищі гармоніки сили струму, ДРП можуть додатково виконувати функції фільтро-компенсувальних пристроїв, поглинаючи шкідливі гармонічні складові.

Окрему проблему становить режим малого завантаження ЛЕП. За таких умов некомпенсована зарядна потужність ліній спричиняє генерацію надлишкової РП самою лінією, що веде до небажаного підвищення рівня напруги на лініях та шинах підстанцій. У ряді випадків це підвищення може виходити за межі допустимих значень, що створює загрозу для обладнання та якості електропостачання.

У попередні десятиліття при проектуванні ЛЕП застосовувався підхід із частковою компенсацією зарядної потужності, що вважалось цілком достатнім за умови стабільно високого завантаження ліній. Однак зміна умов експлуатації енергосистем, зокрема, загальне зниження рівня електроспоживання та скорочення обсягів потужності, що передається по лініях – зробила такий підхід неактуальним.

В сучасних реаліях традиційний рівень компенсації зарядної потужності у діапазоні 40-50 % вже не забезпечує нормальної роботи мережі. Для електричних мереж надвисокого рівня напруги класів 500, 750 та 1150 кВ необхідне суттєве підвищення ступеня компенсації – до 80-120 %, що є принципово новою вимогою до проектування та експлуатації сучасних енергосистем [6, 8, 9].

Найефективнішим з економічної точки зору методом компенсації зарядної потужності в системоутворювальних високовольтних мережах рівнів напруги 330, 500, 750 та 1150 кВ є встановлення шунтувальних реакторів (ШР) відповідного класу напруги безпосередньо в місцях генерації надлишкової РП. Такий підхід дозволяє компенсувати РП там, де вона виникає, уникаючи передачі по мережі та пов'язаних із цим додаткових втрат.

Далі більш детально розглянемо конструктивні особливості керованих реакторів, а також методи регулювання параметрів і характеристик, що безпосередньо визначають ефективність компенсації реактивної потужності в ЛЕП [6, 8, 9].

Існуюча лінійка керованих шунтувальних реакторів (КШР) магнітно-вентильного типу охоплює чотири основні групи пристроїв, призначених для різних класів напруги та умов експлуатації.

Перша група – однофазні керовані дугогасні реактори, що застосовуються в мережах з ізольованою нейтраллю для компенсації ємнісних сил струмів однофазного замикання на землю. Друга група – трифазні КШР для мереж рівнів напруги 6-35 кВ, що обслуговують промислових і побутових споживачів. Третя група охоплює трифазні КШР для високовольтних розподільних мереж

класу напруги 110-220 кВ. Нарешті, четверта група – трифазні групові установки КШР, призначені для транзитних і системоутворювальних ЛЕП надвисокого рівня напруги 330-750 кВ [6, 8, 9].

Керований шунтувальний реактор трансформаторного типу (КШРТ) є спеціалізованим пристроєм, що встановлюється на підстанціях високовольтних ЛЕП класу напруги 110-500 кВ. Конструкція та принцип дії орієнтовані на виконання комплексу взаємопов'язаних функцій в енергосистемі [9].

Основне призначення КШРТ – плавне та швидкодіюче регулювання РП, що дозволяє ефективно розвантажувати обладнання підстанцій і мереж, скорочуючи втрати ЕЕ. Крім того, ШР забезпечує стабілізацію рівня напруги на шинах підстанції, гасить небажані коливання активної потужності в лінії, а також підвищує як статичну, так і динамічну стійкість енергосистеми в цілому, що є особливо важливим в умовах змінних навантажень і аварійних режимів.

Статичні тиристорні компенсатори РП належать до широкого класу пристроїв, що підвищують ефективність роботи електричних мереж і сприяють енергозбереженню в системах передачі та розподілу ЕЕ. Головне призначення – компенсація РП безпосередньо на рівні навантаження [1-5, 7].

Для типових споживачів – асинхронних і синхронних електричних двигунів, індукційних печей, систем освітлення – достатньо встановити нерегульовані конденсаторні батареї безпосередньо на шинах рівня напруги 0,4 або 6-10 кВ. Однак у разі, коли навантаження містить вентильні перетворювачі, що є джерелами вищих гармонік сили струму, виникає додаткова вимога – фільтрація даних гармонік.

Максимальна ефективність роботи СТК досягається при безпосередньому підключенні до ЛЕП або до шин високого рівня напруги підстанції. Саме в такій конфігурації компенсатор здатний виконувати не лише локальну компенсацію РП, а й широкий спектр системних функцій, безпосередньо пов'язаних з керуванням режимами роботи ЛЕП в цілому – стабілізацію напруги, підвищення стійкості, демпфування коливань потужності тощо [6, 8, 9].

Застосування СТК у магістральних мережах високого та надвисокого рівнів напруги пов'язане з суттєвими технічними труднощами, що обмежує використання в даному сегменті енергосистем. Як альтернативне рішення для регулювання РП в таких лініях в Україні та ряді інших країн широко застосовуються КШР, які краще адаптовані до умов роботи на надвисоких рівнях напруги і забезпечують необхідний діапазон регулювання.

Реактори з підмагнічуванням відрізняються складнішою та дорожчою конструкцією порівняно з реакторами трансформаторного типу, однак їхня система керування є дешевшою. Внаслідок цього загальна вартість обох типів реакторів виявляється приблизно рівноцінною, що унеможливорює однозначний економічний вибір між ними лише за ціновим критерієм.

Статичні тиристорні компенсатори вирізняються високою якістю регулювання, проте не можуть підключатися безпосередньо до високовольтних ліній, що вимагає додаткових витрат на встановлення знижувальних

трансформаторів і знижує загальну економічну ефективність застосування в мережах надвисокого рівня напруги.

БКРП є найбільш збалансованим рішенням, оскільки поєднує конструктивні переваги електромагнітної частини керовані шунтувальні реактори трансформаторного типу із більш досконалою системою керування на базі транзисторного блока IGBT. Принципова перевага такого підходу полягає в тому, що транзисторне керування не генерує вищих гармонік сили струму, що повністю виключає необхідність встановлення компенсаційної обмотки та відповідно скорочує витрати на виготовлення пристрою.

### Список літератури:

1. Ягуп В.Г. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання: навч. посіб. / В.Г. Ягуп, К.В. Ягуп; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. – 183 с.

2. Мілих В.І. Електропостачання промислових підприємств: підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків: ФОП Панов А.М., 2016. – 272 с.

3. Базюк Т.М. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / Т.М. Базюк, І.В. Блінов, О.Ф. Буткевич та ін.; за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.

4. Dugan R.C. Electrical Power Systems Quality, Third Edition / R.C. Dugan // McGraw-HillCompanies, Inc. – 2012. – 555 p.

5. Benysek G. Power Theories for Improved Power quality. / G. Benysek, M. Pasko – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.

6. Кирик В.В. Електричні мережі та системи: підручник / В.В. Кирик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с. ISBN 978-966-990-031-9.

7. Вербицький Є.В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є.В. Вербицький // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2018. – № 26 (1302), Т. 2. – С. 121-125.

8. Електричні системи та мережі: конспект лекцій / укладачі: І.Л. Лебединський, В.І. Романовський, Т.М. Загородня. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 214 с.

9. Ковальов О.В. Електричні машини: курс лекцій / О.В. Ковальов. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 175 с.

УДК 621.3

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ НА ЗАГАЛЬНУ КОРОНУ В ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

Оніпченко Р.С., к.ф-м.н. доц. Степанчиков Д.М.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
dmitro\_step75@ukr.net

Науковий керівник: к.ф-м.н. доц. Степанчиков Д.М.

Лінії електропередачі (ЛЕП) надвисокої напруги є основою енергосистеми. Через високу напруженість електричного поля на поверхні проводів виникає загальна корона, яка супроводжується постійним витокм енергії в атмосферу. У масштабах країни навіть невелике зниження питомих втрат дає величезний сумарний ефект економії електроенергії. Точний розрахунок дозволяє ще на етапі проектування обрати оптимальний переріз проводу та кількість проводів у фазі для обмеження коронного розряду [1,2].

Втрати потужності на корону критично залежать від стану атмосфери. Виокремлюються 4 групи погоди: ясна погода (без опадів); сухий сніг; дощ і мокрий сніг; паморозь, іній, ожеледь. Характеристики втрат на корону представляють у виді залежності [1]

$$\frac{P_k}{n^2 r_0^2} = f_j \left( \frac{E_i}{E_0} \right), \quad (1)$$

де  $P_k$  – втрати потужності на корону на проводі, кВт·км<sup>-1</sup>;  $n$  – кількість проводів у фазі;  $r_0$  – радіус проводу, см;  $j=1, \dots, 4$  – група погоди;  $i$  – кількість фаз у лінії;  $E_i$  – робоча напруженість електричного поля на  $i$ -тому проводі, кВ·см<sup>-1</sup>;  $E_0$  – початкова напруженість електричного поля при відносній густині повітря  $\delta = 1$ , кВ·см<sup>-1</sup>.

Функція  $f_j(E_i/E_0)$  називається функцією Петерсона або типовою характеристикою питомих втрат, її часто подають у вигляді таблиць або номограм. Функції Петерсона мають складну природу: вони поєднують зону початкових розрядів, де втрати майже нульові і зону інтенсивної корони, де спостерігається експоненціальне зростання.

Графічні методи мають високу похибку і не підходять для сучасного програмного забезпечення. Математична модель дозволяє інтегрувати розрахунок втрат на корону в комплексні програмні пакети для проектування ЛЕП та аналізу режимів енергосистем. Маючи математичну функцію  $f_j(E_i/E_0)$ , можна виконувати складні операції усереднення та інтегрування втрат за річний цикл з високою точністю.

Для реалізації алгоритму розрахунку втрат у сучасному програмному забезпеченні необхідно перейти від дискретних значень типових характеристик до неперервних математичних функцій. Аналіз експериментальних даних показує, що залежність питомих втрат  $P_k$  від відносної напруженості поля  $X=E_i/E_0$  має чітко виражений експоненціальний характер для всіх чотирьох груп погодних умов і може бути апроксимована залежністю виду:

$$f_j(X) = a_j e^{b_j X}, \quad (2)$$

де  $a_j, b_j$  – емпіричні коефіцієнти апроксимації, що визначають масштаб та крутизну зростання втрат для  $j$ -ї групи погоди.

Глобальна експоненціальна апроксимація часто дає значну похибку або в хвості (малі напруженості), або в зоні критичних втрат, оскільки намагається усереднити поведінку функції на всьому інтервалі. Саме така ситуація спостерігається для функції Петерсона. На рис.1 представлено порівняння та співставлення дискретного експериментального набору [1] значень функції Петерсона (1) та її експоненціальної апроксимації (2) для чотирьох груп погоди. Логарифмічний масштаб вертикальної осі на рис.1, б чітко демонструє значні розбіжності між теоретичними функціями та експериментальними значеннями, які також помітні й у лінійному масштабі осей (рис.1, а).

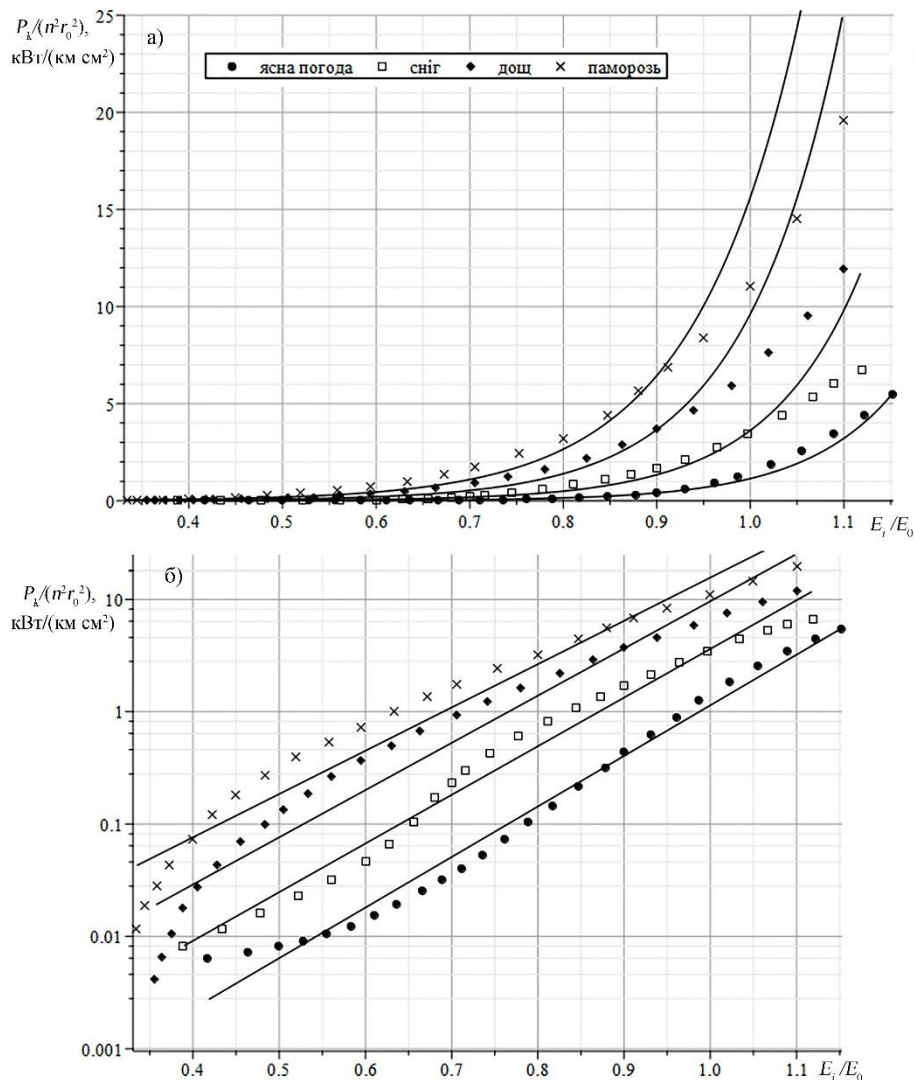


Рисунок 1 – Експоненціальна апроксимація узагальнених характеристик втрат потужності на загальну корону в ЛЕП для чотирьох груп погодних умов: а) лінійний масштаб осей, б) логарифмічний масштаб вертикальної осі

Кубічний сплайн будується локально між вузлами. Це дозволяє йому підлаштовуватися під різку зміну кривизни графіка, що характерно для переходу від докритичного до закритичного режиму напруженості поля. Кубічні сплайни є стійкими, вони дозволяють точно описати експериментальні дані для всіх 4 груп погоди без внесення неіснуючих фізичних екстремумів (рис. 2). Це забезпечує високу точність опису характеристик питомих втрат на корону для всіх метеорологічних груп. У табл. 1 наведено значення середньоквадратичного відхилення ( $RMSE$ ) та коефіцієнту детермінації ( $R^2$ ) для використаних апроксимацій. Результати однозначно демонструють перевагу сплайнової апроксимації над експоненціальною.

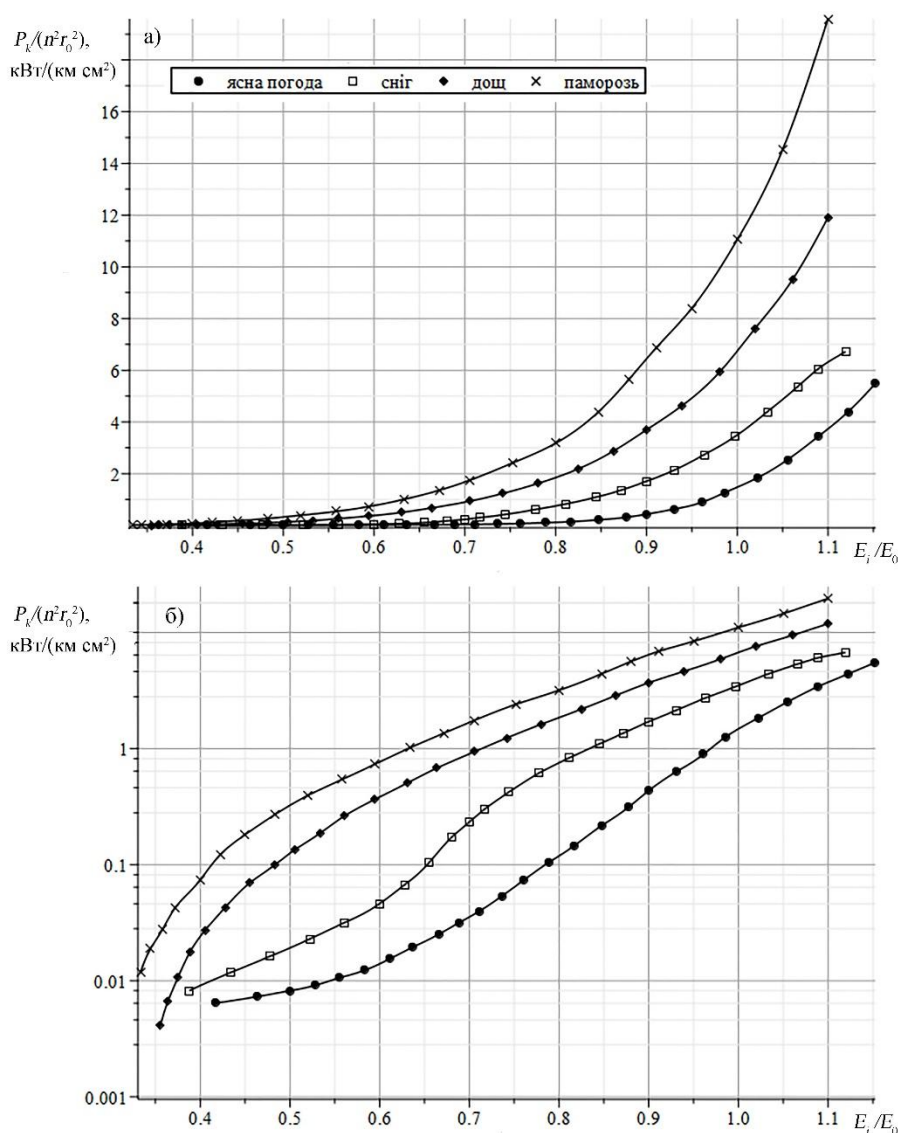


Рисунок 2 – Сплайнова апроксимація узагальнених характеристик втрат потужності на загальну корону в ЛЕП для чотирьох груп погодних умов: а) лінійний масштаб осей, б) логарифмічний масштаб вертикальної осі

Суть сплайнового методу полягає у побудові для кожної групи погоди  $j$  сукупності функцій  $S(X)$ , які на кожному елементарному відрізку  $[X_k, X_{k+1}]$  між

вузлами експериментальних даних представляються поліномом третього ступеня:

$$S_k(X) = a_k + b_k(X - X_k) + c_k(X - X_k)^2 + d_k(X - X)^3, \quad (3)$$

де  $a_k, b_k, c_k, d_k$  – коефіцієнти сплайна, які визначаються з додаткових умов,  $k=1, 2, \dots, n$  – номер сплайна.

Таблиця 1

**Точність використаних апроксимацій втрат потужності на загальну корону в ЛЕП для чотирьох груп погодних умов**

Група погоди	Експоненціальна апроксимація		Сплайнова апроксимація	
	$RMSE$ , кВт/(км см <sup>2</sup> )	$R^2$	$RMSE$ , кВт/(км см <sup>2</sup> )	$R^2$
1. Ясна погода	0.192	0.983	$6.467 \cdot 10^{-16}$	1.000
2. Сніг	1.268	0.619	$7.306 \cdot 10^{-16}$	1.000
3. Дощ	3.255	-0.017	$1.099 \cdot 10^{-15}$	1.000
4. Паморозь	4.486	0.244	$2.412 \cdot 10^{-15}$	1.000

Побудований сплайн забезпечує неперервність самої функції, а також її першої та другої похідних у вузлах стикування. Це критично важливо для подальших операцій статистичного усереднення та інтегрування втрат за річний цикл. Сплайни мінімізують ризик появи неіснуючих фізичних екстремумів, що гарантує стабільність розрахунку в усьому діапазоні робочих напруженостей. Використання сплайнів дозволяє звести похибку апроксимації практично до нуля у вузлових точках і забезпечити високу точність опису характеристик для всіх чотирьох метеорологічних груп, що є необхідною умовою для прецизійного прогнозування енергоефективності ЛЕП.

На відміну від експоненціальної залежності, сплайн – це кускова функція. Для кожної метеогрупи отримуємо не один рядок формули, а цілу таблицю коефіцієнтів для кожного інтервалу. Це ускладнює аналітичне дослідження функції (наприклад, виведення загальних закономірностей) і вимагає зберігання більшого обсягу даних у програмному забезпеченні. Але ці недоліки є несуттєвими за умови наявності якісних експериментальних даних та використання сучасних комп'ютерних програм для чисельних розрахунків. Основний ризик – екстраполяція, тому важливо, щоб діапазон вузлів сплайна повністю перекривав усі можливі робочі напруженості ЛЕП.

**Список літератури:**

1. Розрахунок втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі: методичні вказівки з дисципліни «Техніка високих напруг» / Укл.: О. О. Вакуленко. – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 36 с.
2. Василюк С.В. Техніка високих напруг: навч. посіб. / С.В. Василюк, К.С. Василюк. – Рівне: НУВГП, 2018. – 187 с.

УДК 621.316.1

## ВІД ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ВРАЗЛИВОСТІ ДО РОЗПОДІЛЕНОЇ СТІЙКОСТІ: МОДЕЛЬ SMART GRID + MICROGRID ДЛЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ

Шабров М.Ю.

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

8774202@as.op.edu.ua

Науковий керівник: доктор філософії, доц. Суворов В.О.

Енергетична система України побудована за класичною централізованою архітектурою. Така система складається з потужних електричних станцій та навантажень, що з'єднані між собою високовольтними мережами та локальними мережами розподілення електричної енергії кінцевим споживачам середньої та низької напруги. Поки електроенергія доходить до споживача, вона декілька разів трансформується: на електростанції напруга підвищується до 220, 330 або 750 кВ для передачі магістральною мережею, далі на районних і вузлових підстанціях знижується до 110 кВ, потім до 6, 10 або 35 кВ для розподілу між населеними пунктами і промисловими підприємствами, і нарешті до 380/220 В на місцевих підстанціях – для малих підприємств та населення (рис. 1).

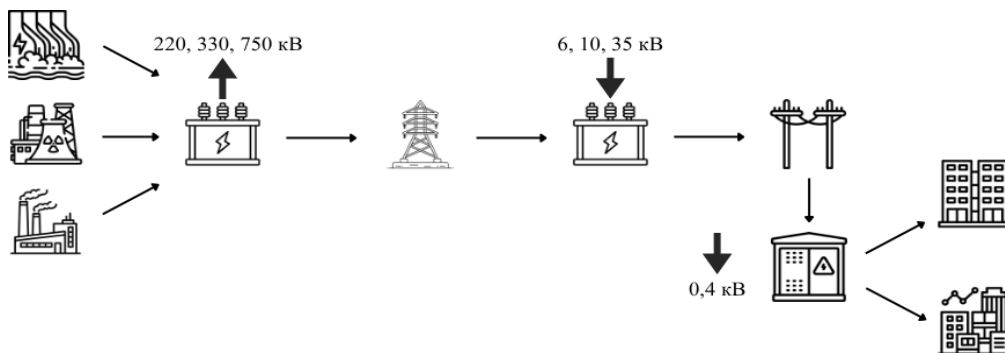


Рисунок 1 – Структура централізованої електроенергетичної системи [1]

До переваг централізованої архітектури побудови енергосистеми можна віднести те, що вона здатна задовольняти потреби енергоємних промислових регіонів, має відносно низьку собівартість виробництва завдяки масовому виробництву [2]. Проте є недоліки, притаманні даним системам: низька структурна стійкість до зовнішніх впливів зумовлює тривалі перерви електропостачання; обмежені маневрові можливості; недостатня здатність системи оперативно реагувати на стрибки споживання; великі втрати при транспортуванні. З огляду на зазначені недоліки, доцільним є перехід до децентралізованих підходів організації електропостачання, зокрема на основі інтеграції технологій Smart Grid та Microgrid, що дозволяє підвищити стійкість системи та забезпечити автономність живлення окремих споживачів.

Перелічені недоліки централізованої архітектури особливо гостро

проявилися в умовах воєнного часу. Концентрація генерації на обмеженій кількості великих об'єктів перетворила АЕС, ГЕС, ТЕС та вузлові підстанції на пріоритетні цілі для атак.

Наслідки атак ілюструє показник SAIDI (індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні). За даними звіту НКРЕКП за 2022 рік, у 2021 році складова SAIDI, спричинена форс-мажорними обставинами та виною інших осіб, становила 444 хв, тоді як у 2022 році вона зросла до 18160 хв. Регулятор наголошує, що цей зріст спричинено пошкодженням або знищенням великої кількості об'єктів енергетичної інфраструктури внаслідок ведення активних бойових дій на території України [3].

Зазначені вище недоліки централізованої моделі обумовлюють розвиток розподіленої генерації, що останніми роками активно впроваджується в Україні в межах курсу на зміцнення енергетичної безпеки. Її суть полягає у децентралізації виробництва: замість кількох великих електростанцій працює мережа невеликих генераторів поблизу споживачів. Технологічно цей підхід реалізується через інтегровану модель Smart Grid з Microgrid.

Smart Grid – це інтелектуальна електромережа, яка об'єднує дії всіх учасників – виробників енергії, споживачів та тих, хто поєднує обидві ролі, задля ефективного, сталого та надійного електропостачання [4]. Головна відмінність від традиційних централізованих мереж – двосторонній рух, при якому електроенергія протікає не лише від станції до споживача, а й дані йдуть у зворотному напрямку, що дозволяє системі реагувати на зміни в реальному часі.

В децентралізованій моделі Smart Grid відіграє роль технологічної платформи. «Розумні мережі» надають можливість системі автоматично виявляти збої в мережі, ізолювати пошкоджені ділянки та перенаправляти потужності без втручання оператора. Саме ця функція критично важлива при розосередженій генерації за великої кількості джерел генерації, якими неможливо керувати вручну [4].

Розумні мережі допомагають керувати мережею, але не змінюють фундаментальну архітектуру системи. Щоб справді підвищити стійкість всієї системи, потрібна розосереджена, локальна, здатна працювати автономно топологія генерації. Важливу роль при вирішенні цих питань відіграє впровадження мікромереж (microgrid).

Мікромережа – це група взаємопов'язаних навантажень та розподілених джерел енергії в межах чітко визначених електричних кордонів, яка функціонує як єдиний керований елемент по відношенню до основної мережі. Така мережа може під'єднуватись та від'єднуватись від основної мережі, що дозволяє їй працювати в автономному або, як його ще називають, острівному режимі [5]. Мікромережі мають єдиний центр управління, генерувальні потужності на базі традиційних та/або відновлювальних джерел енергії та пристрої зберігання енергії (рис. 2). Така гібридна структура джерел енергії нівелює переривчастість окремих ВДЕ та підтримує безперервне живлення критичних навантажень.

До ключових переваг мікромереж належать: автономне живлення

критичної інфраструктури в острівному режимі при пошкодженні магістральної мережі; зменшення втрат на передачу за рахунок наближення джерел до споживача; природна інтеграція ВДЕ й систем накопичення; розосередженість, що багаторазово ускладнює ураження енергосистеми; модульність і швидкість розгортання порівняно з великими генеруючими об'єктами [5, 6]. Наприклад, при пошкодженні магістральної мережі мікромережа переходить в острівний режим і забезпечує автономне живлення критичних об'єктів навіть за повної втрати зв'язку з основною енергосистемою. Крім того, за результатами наукових досліджень, окрім підвищення стійкості, розподілена генерація знижує втрати при передачі на 5–15 % завдяки наближенню джерел до споживача та скорочує час відновлення після аварій за рахунок локальної ізоляції пошкоджених ділянок [6].

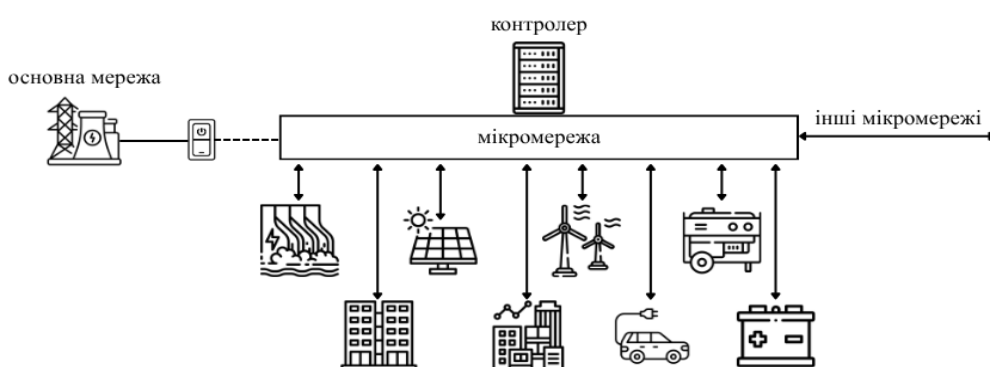


Рисунок 2 – Загальна структура мікромережі

Технології Smart Grid та Microgrid доповнюють одна одну та утворюють єдину архітектуру децентралізованої енергосистеми. Мікромережі формують фізичний рівень розосередженої генерації та забезпечують локальну автономність, тоді як Smart Grid створює комунікаційно-керуючий шар, що інтегрує множину мікромереж в скоординовану систему [6, 7] (рис. 3).

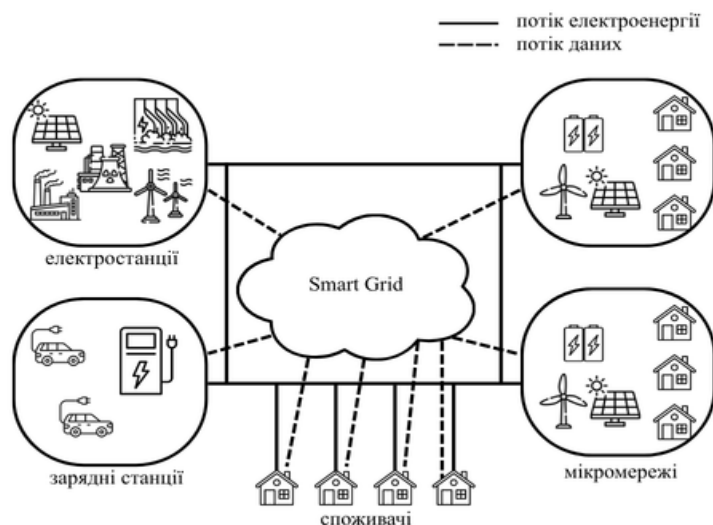


Рисунок 3 – Модель енергетичної системи Smart Grid з microgrid

Україна офіційно взяла курс на розбудову розподіленої генерації та

мікромереж: Енергетична стратегія України до 2050 року (розпорядження КМУ від 21 квіт. 2023 р. № 373-р) визначає розвиток розподіленої генерації, «розумних мереж» та локальних енергосистем як пріоритет забезпечення енергобезпеки й післявоєнного відновлення [8]. Це водночас є обґрунтованою відповіддю на виклики воєнного часу і виконання зобов'язань щодо декарбонізації в межах Угоди про асоціацію з ЄС.

Отже, централізована модель енергосистеми України демонструє обмежену стійкість до зовнішніх впливів, що обумовлює перехід до децентралізованих підходів. Інтеграція Smart Grid та Microgrid підвищує надійність електропостачання, скорочує тривалість перерв, знижує втрати при передачі та забезпечує автономне живлення критичних споживачів навіть у разі пошкодження магістральної інфраструктури. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку практичних моделей впровадження мікромереж для окремих регіонів і об'єктів критичної інфраструктури.

### Список літератури:

1. Касьяненко Є.О. Вдосконалення моделей управління microgrid: магістер. дис. : 141 / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. – 167 с.
2. Письменна У. Енергоринок України і малі виробники: можливості інтеграції / У. Письменна, Г. Трипольська, О. Кубатко // Економіка та суспільство. – 2023. – № 53. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-53-97.
3. Звіт щодо показників якості надання послуг у сферах електропостачання і централізованого водопостачання та водовідведення за 2022 рік [Електронний ресурс]/ НКРЕКП. Київ: НКРЕКП, 2022. – 29 с. – Режим доступу: [https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Monitoring/Zvit\\_yakist\\_posluh/Zvit\\_yakist\\_posluh\\_2022.pdf](https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Monitoring/Zvit_yakist_posluh/Zvit_yakist_posluh_2022.pdf) (дата звернення: 02.04.2026). – Назва з екрана.
4. Butt O.M. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network / O.M. Butt, M. Zulqarnain, T.M. Butt // Ain Shams Engineering Journal. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 687–695. DOI: 10.1016/j.asej.2020.05.004.
5. Kostenko G. Enhancing of the power system resilience through the application of micro power systems (Microgrid) with renewable distributed generation / G. Kostenko, A. Zaporozhets // Системні дослідження в енергетиці. – 2023. – № 3(74). – С. 25–38. DOI: 10.15407/srenergy2023.03.025.
6. Yoldaş Y. Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities / Y. Yoldaş, A. Önen, S.M. Muyeen, A.V. Vasilakos, İ. Alan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 72. – P. 205–214. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.064.
7. Lu W.-M. From technology to strategy: The evolving role of smart grids and microgrids in sustainable energy management / W.-M. Lu, T.-T. Le // Energies. – 2025. – Vol. 18, № 17. – 4609. DOI: 10.3390/en18174609.
8. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квіт. 2023 р. № 373-р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80> (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрана.

УДК 621.3

## ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ КОМПЕНСАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

Денисенко Д.О., Колесник К.А., к.ф-м.н. доц. Степанчиков Д.М.  
*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
dmitro\_step75@ukr.net

Науковий керівник: к.ф-м.н. доц. Степанчиков Д.М.

Необхідність передачі великих потоків потужності на значні відстані призвела до створення повітряних ліній (ПЛ) надвисокої напруги. До недоліків таких ліній відносяться:

- значні втрати електроенергії на корону;
- негативний вплив на людину та навколишнє середовище;
- велика металоємність та вартість.

Новий тип компактних ПЛ змінного струму – двоколові коаксіальні максимально скомпенсовані високовольтні повітряні лінії передачі (ДКПЛ) – вільні від перерахованих недоліків. В основу цих ліній покладений принцип максимальної компенсації як електричних так і магнітних полів. Досягти різкого зменшення напруженості електричного і магнітного полів під ПЛ дозволяє коаксіальне розташування однойменних фаз різних кіл ПЛ [1,2].

Метою дослідження є комп'ютерне моделювання роботи двоколових компактних повітряних ліній електропередачі напругою 500 кВ та обґрунтування техніко-економічної ефективності та екологічної безпеки їх застосування порівняно з традиційними лініями.

Традиційна лінія моделюється як три фази в один ряд (3 проводи). ДКПЛ моделюється як 12 проводів, де проводи кожної фази першого кола ( $A_1, B_1, C_1$ ) оточені трьома фазними проводами другого кола ( $A_2, B_2, C_2$ ) (рис.1). Щоб ДКПЛ працювала як коаксіальна система, вектори полів від першого та другого кола мають бути спрямовані зустрічно. Тобто, якщо у фазі  $A_1$  струм має кут  $0^\circ$ , то у фазі  $A_2$  він має бути  $180^\circ$  відносно неї. Оскільки однойменні фази розташовані близько, їхні вектори напруженості на великій відстані практично накладаються і віднімаються. Завдяки коаксіальному ефекту поле швидше згасає при віддаленні від осі лінії.

Для ліній надвисокої напруги (500 кВ) з великою пропускну здатністю використовується розщеплення фаз. Було прийнято, що кожен фазний провід має розщеплення на  $n=3$  провідників, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника (вставка на рис.1). Таким чином, для ДКПЛ загальна кількість провідників становить 36, що забезпечує більший сумарний переріз та нижчий хвильовий опір. Еквівалентний радіус розщепленої фази  $r_{eq}$  обчислюється як:

$$r_{eq} = \sqrt[n]{nra^{n-1}}, \quad (1)$$

де  $r$  – радіус одиночного провідника,  $a$  – крок розщеплення (відстань між провідниками розщеплення у фазі).

Вихідні параметри для моделювання розподілу електромагнітного поля ПЛ наведено у табл.1.

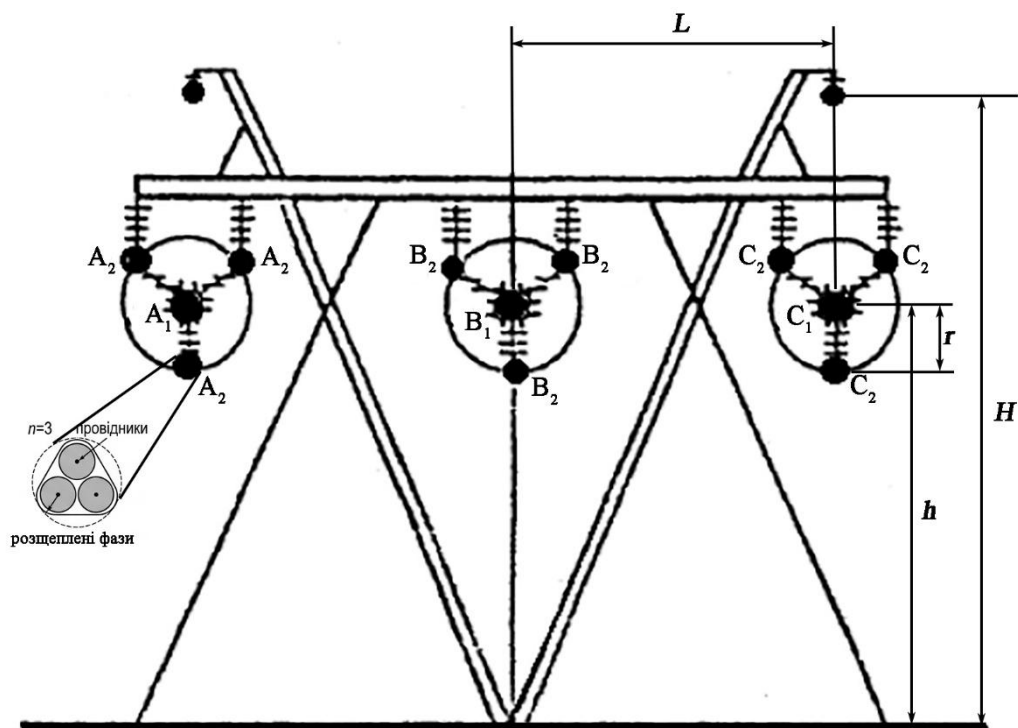


Рисунок 1 – Геометричне розташування проводів ДКПЛ 500 кВ з трьома проводами у фазі,  $P_H = 5,2$  ГВт (на вставці показано, що кожен провід лінії має розщеплення на  $n=3$  близько розташованих провідника)

Таблиця 1

**Параметри досліджуваної ДКПЛ з трьома проводами у фазі**

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Номінальна напруга ПЛ, $U_{nom}$	500	кВ
Активна потужність, $P_H$	5200	МВт
Коефіцієнт потужності, $\cos \phi$	0.95	—
Відстань між фазами ланцюга 1, $L$	12.5	м
Висота над землею фазних провідників ланцюга 1, $h$	20	м
Радіус коаксіального розміщення ланцюга 2, $r$	2	м
Радіус розщеплення фази, $r_{eq}$	0.23	м
Радіус одиночного провідника, $r_0$	0.015	м
Висота захисного тросу, $H$	28	м

Електричне поле ПЛ, розміщеної поряд з провідною поверхнею Землі може бути знайдене методом дзеркальних відображень, при якому вплив всієї провідної поверхні внаслідок дії наведеного в ній заряду замінюється полем дзеркального відображення даного заряду із заміненим на протилежний знак. Для визначення лінійних зарядів  $\tau$  використовується система рівнянь Максвелла у формі потенційних коефіцієнтів [2,3]:

$$[U] = [\alpha][\tau], \quad (2)$$

де  $[U]$  – матриця фазних напруг,  $[\alpha]$  – матриця потенційних коефіцієнтів, елементи якої обчислюються за формулами:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{eq}}; \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}, \quad (3)$$

тут  $h_i$  – висота підвісу  $i$ -го проводу,  $D_{ij}$  – відстань між проводами  $i$  та  $j$ ,  $D'_{ij}$  – відстань між проводом  $i$  та дзеркальним відображенням проводу  $j$ .

Напруженість електричного поля  $E$  у довільній точці простору  $(x,y)$  розраховується як векторна сума від усіх реальних та дзеркальних зарядів:

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{r_i}{|r_i|^2} - \frac{r'_i}{|r'_i|^2} \right), \quad (4)$$

де  $r_i$  та  $r'_i$  – радіус-вектори від  $i$ -го проводу та його відображення до точки розрахунку.

Магнітна індукція  $B$  обчислюється на основі закону Біо-Савара-Лапласа для нескінченно довгих прямолінійних провідників. Компоненти вектору індукції від  $i$ -го провідника зі струмом  $I_i$  дорівнюють:

$$B_{xi} = -\frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{y-h_i}{(x-x_i)^2+(y-h_i)^2}; \quad B_{yi} = -\frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2+(y-h_i)^2} \quad (5)$$

Результати моделювання розподілу електричного і магнітного полів на висоті 1.8 м над землею наведено на рис. 2, числові розрахунки – у табл.2.

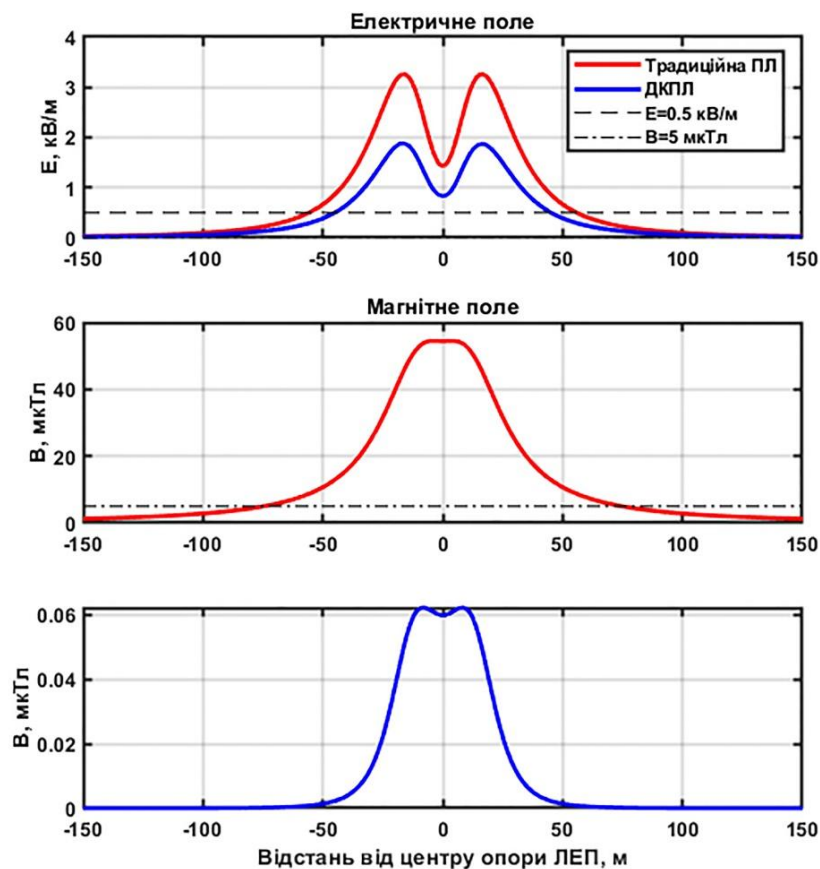


Рисунок 2 – Просторовий розподіл електричного і магнітного полів на висоті 1.8 м над землею для ДКПЛ і традиційної ПЛ (пунктирними лініями показано критичні для біологічної безпеки значення електричного і магнітного полів)

Санітарна зона визначається як мінімальна відстань  $X$  від осі лінії, починаючи з якої виконуються умови:

- напруженість електричного поля  $E \leq 0.5$  кВ/м;
- магнітна індукція  $B \leq 5$  мкТл.

Таблиця 2

**Критичні експлуатаційні характеристики досліджуваних ПЛ**

Характеристики ПЛ	ДКПЛ	Традиційна ПЛ
Санітарна зона (електричне поле)	45.0 м	55.5 м
Санітарна зона (магнітне поле)	0.0 м	72.5 м
Втрати потужності (на 100 км довжини)	93.2 МВт	279.6 МВт

Порівняння просторового розподілу полів (рис. 2) демонструє головну перевагу ДКПЛ – ефект самокомпенсації. Завдяки коаксіальній структурі, електричне поле ДКПЛ згасає значно швидше при віддаленні від осі. Це дозволяє звужити санітарну зону на 10.5 метрів порівняно з базовим варіантом, що дає змогу будувати такі лінії в більш щільних коридорах. Застосування ДКПЛ дозволяє повернути в господарське використання або під забудову 1.05 га землі на кожен кілометр траси.

У ДКПЛ відбувається повна компенсація санітарної зони за магнітним полем, оскільки вектори магнітної індукції від зустрічних струмів однойменних фаз ( $A_1-A_2, B_1-B_2, C_1-C_2$ ) взаємно віднімаються безпосередньо під лінією.

Використання 36 провідників замість 9 (при збереженні того самого перерізу окремого проводу) дозволяє зменшити активні втрати потужності рівно в 3 рази. Це робить ДКПЛ значно ефективнішою для транзиту великих потоків енергії. Збільшення кількості точок підвісу в коаксіальній системі розподіляє сумарний заряд фази більш рівномірно, що запобігає виникненню загальної корони навіть при надвисокій напрузі 500 кВ.

**Список літератури:**

1. Василюк С.В. Техніка високих напруг: навч. посіб / С.В. Василюк, К.С. Василюк. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
2. Бондаренко В.О. Конструкції ліній електропередачі: [для студентів усіх форм навчання електроенергетичних спеціальностей ЗВО України] / В.О. Бондаренко, В.В. Черкашина. – Харків: «Факт», 2020. – 174 с.
3. Гейер Д.В. Моделювання електричного поля трифазної симетричної повітряної лінії електропередачі / Д.В. Гейер, Д.В. Жук, Д.М. Степанчиков // “Актуальні проблеми сучасної енергетики”: зб. тез доп. VIII всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (м. Хмельницький, 23 травня, 2024р.). – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – С. 25-28.

УДК 621.313

## ПАРАМЕТРИЧНА УНІФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ РІЗНИХ ВИДІВ

К.т.н., ст. досл. Мінко О.М.

*Національний аерокосмічний університет  
«Харківський авіаційний інститут», м. Харків  
alexandr.minko@i.ua*

Серійне виробництво електричних машин (ЕМ) залежить від ступеня уніфікації прийняти технічних та конструкторських рішень та стандартизації розрахунків та моделювання фізичних процесів, які виникають при роботі електромеханічного перетворювача енергії (ЕМПЕ). Серійне виробництво має забезпечувати оптимальний рівень якості виготовленого агрегату в поєднанні з мінімізацією матеріальних та людських ресурсів, які витрачаються на проектування та виготовлення потужного ЕМПЕ [1].

Параметрична уніфікація базується на аналізі потреб окремо взятого підприємства, та насамперед береться до уваги його технічні та технологічні можливості, верстатний парк, кваліфікацію персоналу, тощо. Сукупність технологічних та конструктивних ознак ЕМ формує серію машин, та в межах серії досягається уніфікація вузлів та окремих деталей. В межах серійного ряду повинна виконуватись логіка виробництва та проектування цих уніфікованих елементів ЕМ.

Основні напрямки параметричної уніфікації є такі [2]:

- використання в новостворених ЕМ (однакового або близького функціонального призначення) освоєних у виробництві складових елементів (агрегатів, вузлів, деталей, заготовок тощо);
- розробка складових елементів для застосування у новостворених або модернізованих ЕМ;
- розробка конструктивно-уніфікованих рядів для вузлів та деталей (наприклад, креслення у табличному вигляді);
- обмеження доцільним мінімумом номенклатури дозволених до застосування вузлів, деталей та матеріалів.

Параметрично розрізняють такі види уніфікації [3]:

- внутрішньорозмірна (внутрішньовидова) – уніфікація всіх модифікацій певної ЕМ з базовою моделлю, або між собою усередині одного типорозміру;
- міжрозмірна (міжвидова чи міжпроектна) – уніфікація виробів різних типів та з різних параметричних рядів, у тому числі і мультипараметричному вигляді.

Для виконання принципів параметричної уніфікації, в електромашинобудівній галузі, використовують ряди кращих чисел, які побудовані на геометричній прогресії:  $a$ ,  $ax$ ,  $ax^2$ , ...  $ax^{n-1}$ . Достатньо мати чотири десятинних ряду геометричної прогресії:

Ряд	Замінник ряду	Кількість об'єктів в межах ряду
R5	$f_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$	5
R10	$f_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$	10
R20	$f_{20} = \sqrt[20]{10} \approx 1,12$	20
R40	$f_{40} = \sqrt[40]{10} \approx 1,06$	40

Кожен параметричний ряд побудовано на знаменнику прогресії  $f_5, f_{10}, f_{20}, f_{40}$  в інтервалі від 1 до 10. Числа, які вище за отримуються множиною на 10, 100, 1000 і т.д., а числа, які менші за 1 – множиною на 0,1; 0,01; 0,001 і т.д.

По кращім числам та геометричним рядам кращих чисел побудовані ряди потужностей електричних двигунів та трансформаторів. Наприклад, ряд потужностей, найбільш поширених електричних двигунів, максимально наближений до ряду кращих чисел R10 (ДСТУ 2365-94):

0,06	0,75	11,0	55,0	250,0
0,09	1,10	15,0	75,0	315,0
0,12	1,5	18,5	90,0	400,0
0,18	2,2	22,0	110,0	500,0
0,25	3,0	30,0	132,0	630,0
0,37	4,0	37,0	160,0	800,0
0,55	5,5	45,0	200,0	1000,0

На сучасному етапі розвитку електромашинобудування встановлено техніко-економічний взаємозв'язок показників потужності та напруги для електричних двигунів (напругою до 1000 В):

– для асинхронних двигунів:

Потужність, кВт:	0,06 – 0,37	0,55 – 11,0	15 – 110	132 – 400
Напруга, В:	220, 380	220, 380, 660	220/380	380/660

– для двигунів постійного струму:

Потужність, кВт:	0,12 – 0,55	0,12 – 315	22 – 800	400 – 1000	500 – 1000
Напруга, В:	110	220	440	600	750

В межах стандартизації та уніфікації для потужних турбогенераторів розроблено ряд показників напруги: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18,0; 20,0; 24,0 кВ.

### Список літератури:

1. Wiesheu M. Combined parameter and shape optimization of electric machines with isogeometric analysis / M. Wiesheu, T. Komann, M. Merkel // Optimization and Engineering. – 2025. – Vol.26. – P.1011–1038. <https://doi.org/10.1007/s11081-024-09925-0>.

2. Qiao Z. A Universal Parametric Modeling Framework for Electric Machine Design / Z. Qiao, D. Jiang, W. Fu // Energies. – 2023. – Vol. 16, No.16. – P. 5897. <https://doi.org/10.3390/en16165897>.

3. Łuczak D. Parametric identification of multi-mass mechanical systems in electrical drives using nonlinear least squares method / D. Łuczak, K. Zawirski // IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015. – P. 004046-004051. doi: 10.1109/IECON.2015.7392730.

УДК 621.3

## ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ПРОВОДІВ У РОЗЩЕПЛЕНІЙ ФАЗІ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

Котенко Д.О., к.ф-м.н. доц. Степанчиков Д.М.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
dmitro\_step75@ukr.net

Науковий керівник: к.ф-м.н. доц. Степанчиков Д.М.

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується постійним зростанням обсягів передачі електричної енергії на великі відстані та інтеграцією потужних відновлюваних джерел енергії в загальну енергосистему. Для забезпечення ефективної роботи магістральних мереж використовуються повітряні лінії (ПЛ) надвисокої напруги (330 кВ, 500 кВ, 750 кВ і вище). Одним із ключових конструктивних рішень для таких ліній є використання розщепленої фази, що дозволяє не лише збільшити пропускну здатність, але й суттєво вплинути на електромагнітні характеристики лінії.

У лініях надвисокої напруги втрати на загальну корону можуть становити значну частку від загальних втрат енергії, особливо за несприятливих погодних умов. Збільшення кількості проводів у розщепленій фазі дозволяє знизити напруженість електричного поля на поверхні проводів, що є найбільш ефективним способом боротьби з коронним розрядом. Розщеплення фази збільшує еквівалентний радіус фази та, як наслідок, впливає на її активний та індуктивний опір, змінюючи сумарні навантажувальні втрати [1-5].

Таким чином, наукове обґрунтування вибору кількості проводів у розщепленій фазі для ПЛ надвисокої напруги є актуальним науково-прикладним завданням, розв'язання якого дозволить підвищити енергетичну ефективність магістральних електричних мереж.

Метою роботи є оцінка зміни втрат потужності та визначення раціональної кількості складових фази для повітряних ліній різних класів напруги.

Так як на втрати енергії при короні на лінії істотний вплив мають атмосферні явища і погодні умови, виокремлюються 4 групи погоди: ясна погода (без опадів); сухий сніг; дощ і мокрий сніг; паморозь, іній, ожеледь. На рис.1 подані узагальнені криві питомих втрат потужності на корону для вищенаведених видів погоди.

Характеристики втрат на корону представляють у виді залежності [1]

$$\frac{P_{kj}}{n^2 r_0^2} = f_j \left( \frac{E_i}{E_0} \right), \quad (1)$$

де  $P_{kj}$  – втрати потужності на корону на проводі для певної групи погоди, кВт·км<sup>-1</sup>;  $n$  – кількість проводів у фазі;  $r_0$  – радіус проводу, см;  $j=1, \dots, 4$  – група погоди;  $i$  – кількість фаз у лінії;  $E_i$  – робоча напруженість електричного поля на  $i$ -тому фазному проводі, кВ·см<sup>-1</sup>;  $E_0$  – початкова напруженість електричного поля при відносній густині повітря  $\delta = 1$ , кВ·см<sup>-1</sup>.

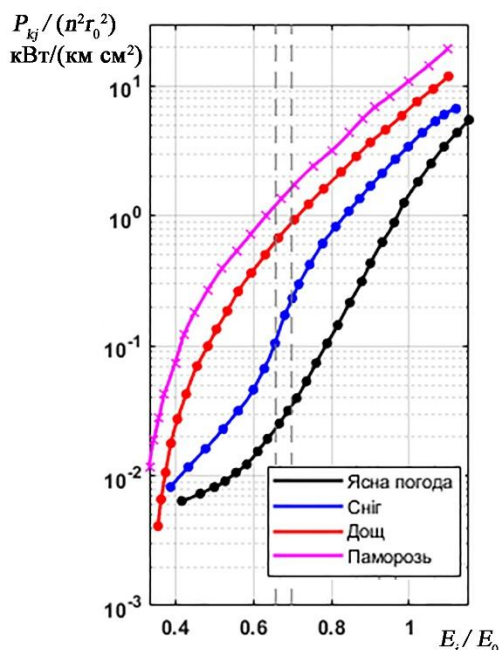


Рисунок 1 – Узагальнені характеристики втрат потужності на загальну корону в ЛЕП для чотирьох груп погодних умов

У трифазній лінії середньорічні втрати потужності на загальну корону визначаються як сумарні для всіх видів погоди згідно виразу [1]:

$$P_k = \frac{n^2 r_0^2}{8760} \sum_{j=1}^4 \left( f_j \left( \frac{E_1}{E_0} \right) + f_j \left( \frac{E_2}{E_0} \right) + f_j \left( \frac{E_3}{E_0} \right) \right) T_j, \quad (2)$$

де  $T_j$  - середньорічна тривалість видів погоди, годин (див. табл.1).

При проектуванні ліній електропередачі у районах з помірним кліматом на рівнинній місцевості (80% території України) рекомендовано приймати тривалість різних видів погоди згідно даних табл. 1 [1,2].

Таблиця 1

**Середньорічна тривалість різних видів погоди**

Види погоди	Тривалість $T_j$ за рік, год
Ясна погода	7120
Дощ та мокрий сніг	500
Паморозь, іній, ожеледь	340
Сухий сніг	800

Припускаючи, що ЛЕП працюють цілий рік, та знаючи середньорічні втрати потужності на корону, можна знайти втрати електричної енергії на корону за відомою формулою

$$\Delta W = 8760 P_k l, \quad (3)$$

де  $l$  – довжина лінії.

Навантажувальні втрати  $\Delta W_R$  пропорційні квадрату струму  $I$ , опору фази  $R$  та часу максимальних втрат  $\tau$ .

$$\Delta W_R = 3 I^2 R \tau. \quad (4)$$

Струм у лінії при фіксованій потужності  $P$  залежить від напруги ЛЕП  $U$  та коефіцієнту потужності  $\cos\varphi$ :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi}. \quad (5)$$

Опір фази визначається питомим опором  $\rho$ , кількістю проводів у фазі  $n$  та довжиною ЛЕП  $l$ :

$$R = \frac{\rho}{n} l. \quad (6)$$

Час максимальних втрат визначається за формулою Кроля:

$$\tau = \left(0.124 + \frac{T_{max}}{8760}\right)^2 8760. \quad (7)$$

При розрахунках було прийнято  $\rho = 0.118$  Ом/км,  $T_{max} = 5000$  год,  $l = 100$  км,  $P = 1500$  МВт,  $\cos\varphi = 0.9$ , провід АС400/22.

Таблиця 2

**Результати розрахунку втрат потужності в ЛЕП надвисокої напруги**

Назва параметра	ЛЕП 750 кВ			ЛЕП 500 кВ		
	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
Площа перерізу фази, мм <sup>2</sup>	1600	2000	2400	1200	1600	2000
Втрати потужності на корону, кВт/км:						
ясна погода	14.13	2.30	1.00	2.14	0.74	0.59
сніг	73.57	12.61	2.76	14.56	2.18	1.11
дощ	169.48	61.65	21.31	51.00	17.84	5.23
паморозь	291.85	116.15	48.51	94.41	38.04	15.07
середньорічні	39.21	11.05	4.16	9.65	3.30	1.47
Річні втрати енергії на корону, млн. кВт·год	34.35	9.68	3.65	8.45	2.89	1.28
Річні втрати енергії на нагрів, млн. кВт·год	61.60	49.28	41.07	184.80	138.60	110.88

На основі розрахункових даних, представлених у табл. 2, можна провести порівняльний аналіз для двох класів напруги (500 кВ та 750 кВ) при зміні кількості проводів у фазі  $n$ . Збільшення кількості проводів у фазі радикально знижує середньорічні втрати на корону. Для ЛЕП 750 кВ перехід від  $n=4$  до  $n=5$  зменшує втрати енергії на корону майже в 3.5 разів (з 34.35 до 9.68 млн кВт·год/рік), а до  $n=6$  – майже в 10 разів. Аналогічна тенденція спостерігається для ЛЕП 500 кВ: збільшення  $n$  з 3 до 5 знижує річні втрати на корону більш ніж у 6.5 раз. Це пояснюється різким зниженням напруженості електричного поля на поверхні проводів при збільшенні еквівалентного радіуса розщепленої фази.

Навантажувальні втрати перебувають у зворотній лінійній залежності від кількості проводів  $n$ , оскільки збільшення кількості проводів збільшує сумарний переріз фази та пропорційно знижує її активний опір  $R$ . Для ЛЕП 500 кВ навантажувальні втрати є домінуючими порівняно з втратами на корону (при  $n=3$  вони складають 184.8 млн кВт·год проти 8.45 млн кВт·год на корону).

У ЛЕП 750 кВ частка втрат на корону в загальному балансі значно вища, ніж у ЛЕП 500 кВ. При недостатній кількості проводів ( $n=4$ ) втрати на корону становлять понад 35 % від сумарних річних втрат енергії. При  $n=6$  ця частка падає до 8 %. Найбільш критичними погодними умовами для обох класів напруги є паморозь та ожеледь, де питомі втрати на корону (кВт/км) зростають у десятки разів порівняно з ясною погодою.

Підтверджено, що збільшення кількості проводів у фазі є дієвим засобом зниження як навантажувальних втрат, так і втрат на загальну корону в лініях надвисокої напруги.

Для ЛЕП 750 кВ використання 4-х проводів у фазі призводить до надмірних втрат на корону. Перехід до  $n=5$  або  $n=6$  є техніко-економічно обґрунтованим, оскільки суттєво (на 20–30 млн кВт·год на 100 км лінії) знижує річні втрати енергії. Для ЛЕП 500 кВ при заданій потужності 1500 МВт основним фактором є зниження навантажувальних втрат. Збільшення  $n$  з 3 до 5 дозволяє заощадити близько 74 млн кВт·год енергії на рік на 100 км лінії.

Розрахунки доводять, що середня інтенсивність коронного розряду визначається переважно несприятливими погодними умовами (дощ, паморозь), попри їх малу річну тривалість. Це необхідно враховувати при виборі конструкції фази для регіонів з високою вологістю.

Оптимізація кількості проводів дозволяє значно підвищити енергоефективність магістральних мереж, що особливо важливо в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії та зростання вартості технологічних втрат електроенергії.

### Список літератури:

1. Розрахунок втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі: методичні вказівки з дисципліни «Техніка високих напруг» / Укл.: О. О. Вакуленко. – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 36 с.
2. Василець С.В. Техніка високих напруг: навч. посіб. / С.В. Василець, К.С. Василець. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
3. Бондаренко В.О. Конструкції ліній електропередачі: [для студентів усіх форм навчання електроенергетичних спеціальностей ЗВО України] / В.О. Бондаренко, В.В. Черкашина. – Харків: «Факт», 2020. – 174 с.
4. Степанчиков Д.М. Дослідження впливу різних принципів автоматичного керування на генерацію потужності вітроенергетичної установки / Д.М. Степанчиков, Д.О. Денисенко, С.О. Васильченко // зб. тез доп. XIII всеукраїнської науково-практичної конференції з автоматичного управління (м. Херсон-Хмельницький, 13-15 квітня, 2026 р.). – Херсон, Видавництво ПП Вишемирський В.С., 2026. – С. 92-96.
5. Гейер Д.В. Моделювання електричного поля трифазної симетричної повітряної лінії електропередачі / Д.В. Гейер, Д.В. Жук, Д.М. Степанчиков // «Актуальні проблеми сучасної енергетики»: зб. тез доп. VIII всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (м. Хмельницький, 23 травня, 2024р.). – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – С. 25-28.

УДК 621.311

## НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ХЕРСОНЩИНІ

Агаджанов Г.Х., к.т.н., доц. Курак В.В.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
vk\_74@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Курак В.В.

Розвиток розподіленої генерації є одним з пріоритетів, закладених в Енергетичній стратегії України на період до 2050 року [1]. Такий підхід до збільшення встановлених потужностей об'єктів електричної генерації здатен мінімізувати ризики колапсу електроенергетичної системи внаслідок цілеспрямованих атак з боку ворога і є нагальною потребою в умовах військової агресії, що триває.

Нова енергетична стратегія України визначає курс на повну трансформацію енергетичної системи держави з акцентом на енергетичну незалежність, безпеку, декарбонізацію та повну інтеграцію українських енергетичних ринків з Європейським Союзом. Однією з ключових цілей цієї стратегії є масштабне нарощування встановлених потужностей об'єктів вітрової генерації до 140 ГВт, а сонячної генерації – до 94 ГВт.

Вагомий внесок у досягнення цієї цілі здатна зробити Херсонщина після звільнення тимчасово окупованих територій, маючи значний потенціал до масштабування встановлених потужностей об'єктів розподіленої генерації, що використовують відновлювані джерела енергії, зокрема, енергію вітру і Сонця. Так, за оцінками, проведеними Інститутом відновлюваної енергетики НАН України, кліматичні умови Херсонської області дозволяють досягти річного обсягу генерації електричної енергії вітровими станціями на рівні 94397 млн. кВт·год/рік, а сонячними електростанціями – близько 4696 млн. кВт·год/рік [2], що в сумі становить майже 100 000 млн. кВт·год – 2/3 від загального споживання електроенергії в Україні у довоєнний 2021 рік [3]. Отримані цифри підтверджують перспективи перетворення Херсонщини з енергодефіцитного в енергопрофіцитний регіон лише за рахунок масштабного нарощування встановлених потужностей вітрових та сонячних електростанцій.

Більшість території Херсонської області відноситься до місцевості з достатньою для розвитку вітроенергетики середньорічною швидкістю вітру, яка на висоті 10 м від земної поверхні знаходиться в діапазоні від 4,1 м/с до 4,5 м/с. Сильні вітри є характерними для холодної пори року. В теплу пору року вони слабшають. Втім, це зменшення швидкості вітру компенсується додатковими локальними вітрами, так званими бризами.

Зазначені показники вітрового режиму, степова зона із значними низькопродуктивними з аграрної точки зору площами, наявність шляхів сполучення і портів дозволяють віднести Херсонщину до територій, де спорудження потужних вітропарків має стати основним напрямком розвитку

вітроенергетики. Найбільш перспективними для цього є 25 – 30 % територій вздовж узбережжя Чорного і Азовського морів, а також Сиваш. Втім, побудова потужних вітропарків потребує залучень значних інвестицій, нестача яких може стати суттєвим гальмівним фактором.

Стрімке ж збільшення встановлених потужностей за рахунок активного розвитку індивідуальних мережевих та автономних вітроелектричних систем є малоімовірним у зв'язку з проблемами їх інтеграції в урбаністичне середовище, а також факторами, пов'язаними з шумом та вібрацією. Втім, певний внесок в розвиток вітроелектричної генерації здатні здійснити приватні домогосподарства сільської місцевості. Вирішальним фактором впливу на темпи розвитку цього напрямку є вдосконалення існуючих та впровадження нових стимулів від держави для встановлення індивідуальних вітроелектричних станцій фізичними особами.

Щодо сонячної електроенергетики, то тут не вбачається значних обмежень як на побудову потужних фотоелектричних станцій на вільних малоцінних з сільськогосподарської точки зору територіях, так і на сонячні системи порівняно невеликої потужності дахового та фасадного типів, які доволі легко інтегруються в урбаністичне середовище населених пунктів. Під час повоєнного відновлення, капітальної реконструкції та спорудження нових будівель в населених пунктах області варто приділити увагу розробці проєктів з ВІРВ-системами, інтегрованими в конструкцію будівель [4], які в кліматичних умовах Херсонщини здатні забезпечити річну генерацію електричної енергії в обсязі від 107 кВт·год до понад 150 кВт·год з 1 м<sup>2</sup> займаної площі фасаду та даху, відповідно. У зв'язку з цим, масштабування встановлених потужностей об'єктів сонячної електричної генерації може бути реалізоване більш швидкими темпами, ніж у випадку вітроелектричних систем.

### Список літератури:

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. №373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (дата звернення 28.03.26).
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / За заг. ред. С.О. Кудрі. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
3. Динаміка і структура споживання електроенергії в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uaea.com.ua/dysp/ee-cons.html> (дата звернення 28.03.26).
4. Курак В. Перспективи використання фотоелектричних фасадів під час повоєнного відновлення будівель / В. Курак, О. Андропова // Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні Херсонщини: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ХНТУ, 26–28 квітня 2023 р.) у 2-х т. ; Т. 1 / за ред. О. В. Чепелюк. – Одеса: Олді+, 2023. – С. 265-268.

УДК 621.311

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Хайнус М.В., к.т.н., доц. Андропова О.В.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький  
kev\_ku@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Андропова О.В.

Впровадження резервних джерел живлення на сьогодні в Україні стало базовою потребою. Забезпечення енергонезалежності споживачів дає можливість функціонування в умовах аварійних та віялових відключень, що запроваджуються через регулярні атаки на критичну інфраструктуру. Для створення резервних джерел живлення найчастіше застосовують акумуляторні батареї на основі свинцево-кислотних або літій-залізо-фосфатних електрохімічних систем. Хоча свинцево-кислотні акумуляторні батареї характеризуються відносно низькою ціною, але за питомою енергією, терміном служби при роботі у циклічному режимі, допустимою глибиною розряду та ефективністю циклу заряду-розряду суттєву перевагу мають більш дорогі літій-залізо-фосфатні акумулятори. Техніко-економічне обґрунтування вибору електрохімічної системи акумуляторних батарей потребує визначення їх терміну експлуатації в заданих умовах функціонування.

В даній роботі визначено вплив умов експлуатації літій-залізо-фосфатних акумуляторів на темпи їх деградації. Моделювання проведено в програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 1).

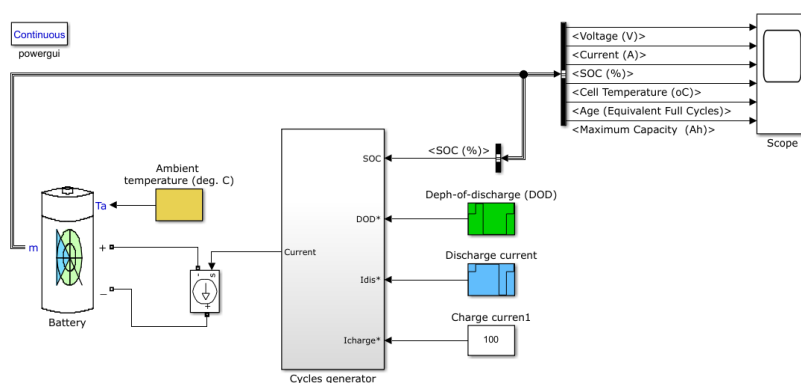


Рисунок 1 – Модель дослідження темпів деградації літій-іонної акумуляторної батареї

В блоці Battery введено параметри літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї EverExceed 48200-T ємністю 200 А·год, номінальною напругою 48 В. Акумулятор піддається циклуванню протягом 2000 годин при температурах навколишнього середовища  $t_a$  25 °С та 40 °С, а також при різній глибині розряду (DOD) та швидкості розряду, що задається значенням розрядного

струму (табл. 1). Результати моделювання наведено на рис. 2.

Таблиця 1

**Режими циклування**

$t, \times 10^6$ с	0,00	0,72	1,44	2,16	2,88	3,60	4,32	5,04	5,76	6,48
$I_p, A$	20			40	100	20			40	100
DOD, %	20	40	80			20	40	80		
$t_a, ^\circ C$	25					45				

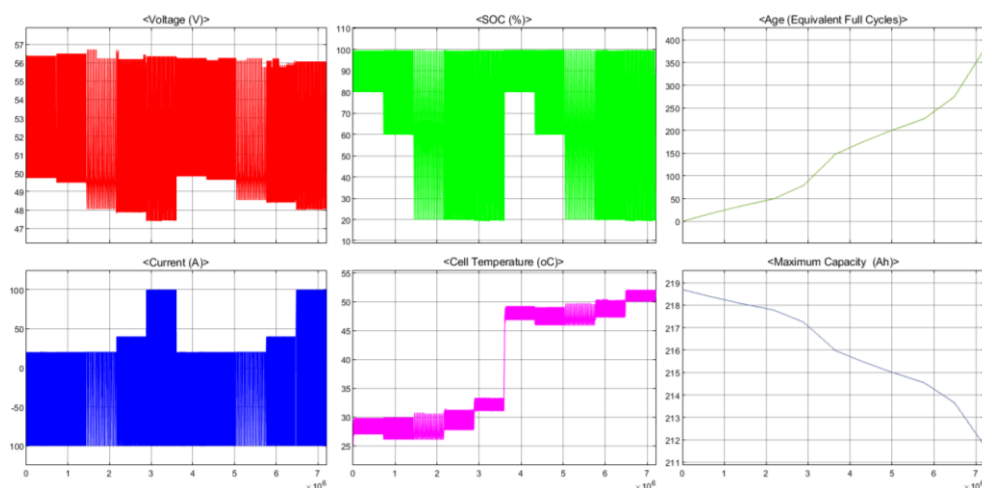


Рисунок 2 – Циклування літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї

Як видно з рис. 2, при розряджанні з малою швидкістю 0,1 С (струм 20 А) глибина розряду не суттєво впливає на темпи деградації. При температурі оточуючого середовища 25 °С акумуляторна батарея нагрівається до 28 °С і в такому режимі експлуатації за 200 год. термін її дії скорочується в середньому на 16 повних циклів заряду-розряду, тобто ємність зменшується на 0,14 %. Збільшення швидкості розряду до 0,5 С (струм 100 А) при DOD=80 % приводить до підвищення температури до 32 °С та втрати 0,54 % ємності за 200 год. експлуатації.

Експлуатація в умовах підвищених температур оточуючого середовища приводить до більш суттєвого розігріву акумуляторної батареї до 51 °С, а, отже, до збільшених темпів деградації. Так, при швидкості розряду 0,5 С за 200 год. роботи в режимі циклування на глибину 80 % втрачається 1,9 % ємності, тобто термін експлуатації зменшується на 105 циклів.

Проведене моделювання при температурі оточуючого середовища 0 °С показало з одного боку, зниження темпів деградації в 2 рази у порівнянні з експлуатацією при 25 °С, а, з іншого – зменшення ємності на 8 % через зниження швидкості протікання процесів розряду та заряду.

Отже, дослідження режимів роботи літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї показало, що найбільший вплив на ємність та темпи деградації чинять температурні умови роботи, які погіршуються при відхиленні температури оточуючого середовища від оптимального значення 20-25 °С або при розігріві акумуляторів в режимах циклування великими струмами.

## **Секція 2**

# **Теплоенергетика**

УДК 66.047.3:66.045.1:537.86

## **МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГРАНИЧНОГО ЧАСУ МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ РОСЛИННОГО МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСАХ КОМБІНОВАНОЇ ЕКСТРАКЦІЇ**

Фатєєва К.О., Комендант С.Г.

*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

Карпауска@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Бошков Л.З.

При застосуванні методу екстрагування, в якому мікрохвильове нагрівання поєднується з іншими техніками (наприклад, ультразвуковою, ферментативною, рідинною, надкритичною флюїдною екстракцією та ін.), або комбінована мікрохвильова екстракція (КМЕ), можливе отримання ряду позитивних ефектів, таких як підвищення виходу цільових речовин, зниження часу обробки та енергоспоживання КМЕ в порівнянні з традиційними методами екстракції [1, 2]. Під час мікрохвильового опромінення енергія може швидко поглинатися водою у клітинах та паренхімі. Швидке випаровування води всередині біоматеріалу створює високий тиск, що призводить до розриву клітин, збільшення площі контакту між твердою та рідкою фазами і, отже, кращого доступу розчинника до цільових компонентів [3].

Найбільш поширеною проблемою традиційних методів є тривалість процесу, він займає 8, 16, 24 години і більше. Фактори часу та потужності тісно переплетені один з одним, оскільки зі збільшенням потужності процес займає менше часу, і навпаки. Завдяки своїм унікальним властивостям КМЕ, порівняно з традиційною екстракцією розчинником, широко застосовується в лабораторних умовах. Проте масштабування технології є складним завданням, а робочі умови важко оцінити через різні конфігурації, що часто використовуються.

Природну структуру рослинної клітини можна розглядати як замкнутий об'єм, а комбінація таких клітин утворює складнішу систему, в якій клітини контактують з міжклітинним простором, що утворює систему капілярних каналів. Клітинні стінки є радіопрозорими. Основний вміст клітин становить вода та розчини речовин на її основі. Високі властивості міцності стінки визначаються впорядкованістю молекулярних ланцюжків полімерів целюлози. Можна уявити клітину як замкнутий об'єм, а система (ансамбль) клітин є структурою, яка поєднує безліч замкнутих об'ємів. Стінки рослинної клітини є досить міцним і жорстким каркасом, пори в якому заповнені рідиною. Клітинна мембрана еластична, через неї здійснюється надходження поживних речовин та рідини в клітину та виведення продуктів життєдіяльності шляхом дифузії та осмосу. При мікрохвильовій обробці температура у клітині зростає, цитоплазма розширюється і починає тиснути на клітинні стінки. Далі тиск у клітині наростає й у кінцевому підсумку призводить до розриву мікрофібрил клітинних

стінок. В даний час загально визнаною моделлю біологічної мембрани є рідинно-мозаїчна модель Ніколсона та С. Сінгера.

Складено методика розрахунку граничного часу обробки рослинного матеріалу  $\tau_{zp}$  в мікрохвильовому полі, тобто часу, при перевищенні якого відбуватиметься порушення цілісності клітинних стінок [4]. Маючи в своєму розпорядженні ці дані, можна визначити рекомендовану тривалість мікрохвильової обробки в технологіях екстрагування біологічно активних речовин:  $\tau_{обр} = 1,13 \cdot \tau_{zp}$ . Множник 1,13 було визначено з міркувань енергетичної ефективності на підставі аналізу експериментальних даних дослідження теплового впливу мікрохвильового поля на рослинну тканину.

У загальному вигляді розрахунок пропонується проводити за таким алгоритмом.

1. Для рослинної клітини визначити граничний об'єм  $V_{zp}$  – тобто той об'єм, що може бути досягнутий при термічному розширенні протоплазми без руйнування клітинних стінок.

2. Зміна температури у процесі збільшення об'єму клітини від  $V_0$  до  $V_{zp}$  визначається із співвідношення:  $\Delta t = \frac{V_{zp} - V_0}{\beta V_0}$ , де  $\beta$  – коефіцієнт температурного розширення води з урахуванням вологовмісту розрахункової одиниці.

Звідси можна визначити граничну температуру нагрівання, за якою під дією мікрохвильового поля руйнуються клітинні стінки.

3. Визначається кількість поглиненої теплоти, витрачену на нагрівання всього об'єму рослинної тканини масою  $m$  до розрахункової температури:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r, \text{ Дж} \quad (1)$$

4. Час, протягом якого це тепло було отримано:

$$\tau = Q / (q \cdot V), \text{ с} \quad (2)$$

де  $V$  – об'єм матеріалу,  $q$  – питома теплота перетворення мікрохвильової енергії у внутрішню енергію матеріалу:

$$q = 0.556 \cdot 10^{-10} \cdot f \cdot \varepsilon'' \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3 \quad (3)$$

де  $f=2450$  МГц – частота мікрохвильового електромагнітного поля,  $\varepsilon''$  - коефіцієнт діелектричних втрат,  $E$  - напруженість електричного поля, В/м.

При перевищенні цього часу клітинні стінки (оболонки) не можуть збільшувати свій об'єм. У середині об'єкта при подальшому підведенні енергії МХ поля починає різко зростати тиск, викликаючи розрив клітинних стінок. Іншими словами, мікрохвильова енергія перетворюється на внутрішню енергію тіла, що реалізується у збільшенні температури тіла та зміні тиску, призводячи до розриву мікрофібрил клітинних стінок.

Для визначення залежності напруженості електричного поля  $E$  від виду рослинної тканини, його маси та діелектричних характеристик, можна застосовувати формулу (4) і дані експериментів, в ході яких контролювалася зміна температури  $t$  матеріалу масою  $m$  і теплоємністю  $c$ , зміна маси тіла за рахунок випаровування  $\Delta m$  (якщо цей процес мав місце). З використанням

рівняння теплового балансу (без урахування втрат у навколишнє середовище) значення напруженості електричного поля виражається такою залежністю:

$$E = \sqrt{\frac{Q_{кор}}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot tg \delta}} = \sqrt{\frac{m \cdot c_p \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot tg \delta \cdot V \cdot \tau}}, \text{ В/м} \quad (4)$$

де питомий тепловий потік  $Q_{кор}$ , що витрачається на нагрівання досліджуваного зразка об'ємом  $V$  і випаровування вологи за час  $\tau$ , визначається залежністю:

$$Q_{кор} = (m \cdot c_p \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r) / (V \cdot \tau), \text{ Вт/м}^3. \quad (5)$$

Залежність (5) можна уточнити, врахувавши втрати в довкілля, які визначаються променистою  $Q_{пром}$  та конвективною  $Q_{конв}$  складовою. Крім того, точність розрахунку залежить також від точності визначення величин діелектричних постійних і від рівномірності розподілу електромагнітного поля в матеріалі.

Розрахунок напруженості електричного поля проведено для зерна гречки масою 1,2 кг при товщині шару  $\delta=0,03$  м та площі поверхні  $F_{нов} = 47 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Для зерна гречки фактор діелектричних втрат на частоті  $f=2450$  МГц при вологості 17 % дорівнює  $\varepsilon'' = 2,35$ , при вологості 9 % -  $\varepsilon'' = 1,18$ . Вихідна потужність магнетрону в усіх експериментах становила  $P=1$  кВт.

Об'єм рослинної клітини зародка зерна за даними [5] орієнтовно становив  $V_0 = 3,35 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>. Максимально допустимий об'єм клітини, оцінку якого проведено за даними [5], становить  $V_{сп} = 3,366 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>. Для цих умов отримано, що гранична температура становитиме  $t_{сп} = 46,1$  °С.

Теплоємність вологого рослинного матеріалу визначається за залежністю від вологості:

$$c = 0,01 [c_0 (100 - w) + c_w \cdot w], \quad (6)$$

де  $w$  – вологість матеріалу,  $c_0$  – теплоємність сухого матеріалу,  $c_w$  – теплоємність води.

При розрахунку напруженості електричного поля  $E$  враховувався вплив вологості  $w$  на фактор діелектричних втрат  $\varepsilon''$ . Для визначення корисного теплового потоку використовувалися результати експериментів, проведених на гречаному зерні. Корисна теплота  $Q_{кор}$  - кількість теплоти, отримане матеріалом при обробці в мікрохвильовому полі, визначається за результатами експерименту, Дж;  $Q$  – кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання до граничної температури, Дж.

Нижче наведено результати розрахунків, отримані при різних значеннях вологості для початкової температури зерна 20 °С.

Отримано, що зі зниженням початкової температури матеріалу за однакової вологості значення граничного часу збільшуються, що пов'язано з необхідністю більшого підведення енергії до досягнення граничної температури. Зі збільшенням вологості тривалість мікрохвильової обробки трохи знижується, що пояснюється зростанням фактора діелектричних втрат – у

досліджуваному діапазоні  $\varepsilon''$  збільшилася у 2,5 разів, тоді як квадрат напруженості електричного поля зменшився у 1,9 разів.

Таблиця 1

**Результати розрахунку граничного часу обробки зерна гречки у мікрохвильовому полі. Маса матеріалу  $m=1,2$  кг, час мікрохвильової обробки  $\tau=180$  с**

$w$	$c_p,$ Дж/(кг·К)	$\Delta t,$ кг	$Q_{кор},$ Дж	$\varepsilon''$	$E,$ В/м	$Q,$ Дж	$\tau_{гр},$ с
0,09	1788	$1 \cdot 10^{-3}$	88081	1,18	1469	58257	119
0,13	1893	$2,1 \cdot 10^{-3}$	91233	1,77	1221	56258	111
0,17	1999	$5 \cdot 10^{-3}$	109636	2,35	1162	64866	106
0,2	2078	$6,2 \cdot 10^{-3}$	112632	2,93	1054	65019	104

Методика розрахунку, що ґрунтується на рівнянні теплового балансу, дозволяє оцінити граничний час залежно від вологості матеріалу та початкової температури з урахуванням ультраструктури рослинної клітини.

**Список літератури:**

1. Jiménez-Amezcuа I. Simultaneous microwave-assisted extraction of bioactive compounds from aged garlic / I. Jiménez-Amezcuа, A. González-Prada, M. Díez-Municio, A.C. Soria, A.I. Ruiz-Matute, M.L. Sanz // Journal of Chromatography A. – 2023. – Vol. 1704. – P. 464128. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.464128>.
2. Chan C.-H. Optimization of microwave-assisted extraction based on absorbed microwave power and energy / C.-H. Chan, R. Yusoff, G.-C. Ngoh // Chemical Engineering Science. – 2014. – Vol. 111. – P. 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.02.011>.
3. Zhang W. Simultaneous extraction and purification of alkaloids from *Sophora flavescens* Ait. by microwave-assisted aqueous two-phase extraction with ethanol/ammonia sulfate system / W. Zhang, D. Zhu, H. Fan, X. Liu, Q. Wan, X. Wu, P. Liu, J.Z. Tang // Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 141. – P. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.014>.
4. Volgusheva N. Study into effects of a microwave field on the plant tissue / N. Volgusheva, E. Altman, I. Boshkova, A. Titlov, L. Boshkov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, no. 8 (90). – P. 47–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.115118>.
5. Suzuki K.G.N. Refinement of Singer-Nicolson fluid-mosaic model by microscopy imaging: Lipid rafts and actin-induced membrane compartmentalization / K.G.N. Suzuki, A. Kusumi // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes. – 2023. – Vol. 1865, no. 2. – P. 184093. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2022.184093>.

UDC 621.311

## ACCUMULATION OF DAMAGE IN HIGH-TEMPERATURE ELEMENTS OF A TURBINE UNIT

PhD (Engineering), associate professor Pugachova T.M.,  
Olizarenko V.O.

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv*  
tatpch@ukr.net

Supervisor: PhD (Engineering), associate professor Pugachova T.M.

The object of this study is the integrally forged rotors of steam turbines, which operate at a maximum metal temperature of up to 540 °C. Their significant mass and rotational speed (3000 rpm) result in a high level of cyclic stresses, reaching maximum values in the disk rims at the blade attachment points and in the rotor core near the surface of the axial channel. Combined with elevated temperature, these stresses induce creep processes in the metal, which limit the rotor's service life [1].

During turbine start-ups and shutdowns, stresses develop on the rotor surface that reach the material's yield strength in stress concentration zones. When the turbine operates in a maneuvering mode, damage accumulation from low-cycle fatigue is comparable to that from creep.

Damage accumulation is localized in a thin surface layer of the component. A plastically deformed layer forms near the surface under applied static or cyclic loading. If the applied stress reaches the material's yield strength, this layer extends through the entire cross-section. During plastic deformation in the near-surface layer, along with dislocation emergence at the metal surface, an excess of vacancies arises at the interface between plastically and elastically deformed metal due to the absence of dynamic equilibrium between dislocation generation and annihilation. At elevated temperatures, vacancies may coalesce to form pores, with their concentration also being highest in the subsurface layers.

Near the rotor axial channel, creep cracks are most likely to initiate in the subsurface layer if the material exhibits sufficient plasticity. In thermal grooves, low-cycle fatigue cracks are expected to initiate directly on the surface.

Periodic removal of a surface layer 100–200 μm thick (the plastically deformed layer) allows for almost complete restoration of the rotor's cyclic life. The rotor's static life can be increased by periodically machining the surface; however, the optimal depth of the removed layer should be approximately 2 mm.

### References:

1. Hichov Yu.O. Thermal Power Plants and Problems of Electricity Conversion. Part 1: Textbook / Yu.O. Hichov. – Dnipro: NMETAU, 2017. – 59 p.

УДК 621.577:620.92:621.3

## **ПІДХОДИ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ**

Рашевський А.М., к.т.н., доц. Круглякова О.В.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
м. Харків*

krugliakovaov@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Круглякова О.В.

Системи централізованого теплопостачання сьогодні перебувають у стані трансформації, пов'язаної з необхідністю декарбонізації, зменшення споживання викопного палива та підвищення енергоефективності. Одним із ключових напрямів модернізації є інтеграція низькопотенційних джерел теплоти. У сучасних умовах такі джерела перестають розглядатися як допоміжні й дедалі частіше стають складовою енергетичного балансу міст, особливо у поєднанні з тепловими насосами та системами акумуляування енергії.

Міжнародний досвід свідчить, що універсальної моделі інтеграції низькопотенційного тепла не існує. У країнах Північної Європи розвиток теплопостачання пов'язаний із концепціями 4-го та 5-го покоління (4GDH, 5GDHC), які передбачають зниження температурного рівня мережі, інтеграцію відновлюваних і вторинних джерел енергії, використання теплових насосів та цифрових систем керування [1]. Для 5GDHC характерні майже ізотермічні мережі з локальними тепловими насосами у споживачів та двонаправленим обміном енергією між будівлями. Разом із тим європейська модель потребує значних капіталовкладень, модернізації внутрішніх систем опалення та високого рівня енергоефективності будівель [2]. Саме тому її повномасштабне впровадження в існуючих високотемпературних мережах є складним, особливо для країн із застарілою інфраструктурою.

Північноамериканський підхід базується переважно на локальних низькотемпературних теплових мережах, у яких теплоносій циркулює при температурі, близькій до температури довкілля, а доведення теплоти до потрібного рівня здійснюється локальними тепловими насосами окремих будівель або груп будівель. Це дає системі високу гнучкість, однак потребує складного цифрового керування. Таким чином, це рішення скоріше для нових районів або кампусів [3].

Азійська школа, представлена насамперед Японією та Південною Кореєю, орієнтована на використання конкретних міських джерел тепла: стічних вод, річкової та морської води, метро та іншої транспортної інфраструктури. Найбільш поширеними є системи утилізації тепла стічних вод із тепловими насосами, які демонструють високі сезонні коефіцієнти перетворення та стабільність роботи. Однак такі рішення мають переважно локальний характер і залежать від інфраструктурних особливостей міста: якщо у Японії системи

централізованого теплопостачання історично формувалися переважно у вигляді районних систем тепло- і холодопостачання для щільної міської забудови, то у Південній Кореї розвиток був орієнтований на великомасштабні централізовані системи теплопостачання житлових комплексів [4].

Окрему модель формує Китай, де інтеграція низькопотенційних джерел здійснюється переважно за рахунок масштабного використання промислового скидного тепла. На відміну від європейської концепції, китайський підхід не передбачає радикального зниження температурного графіка мереж. Низькопотенційне тепло інтегрується в існуючі високотемпературні системи через централізовані теплові насоси великої потужності, що дозволяє модернізувати теплопостачання без повної реконструкції мереж і є особливо актуальним для промислових міст [5].

Аналіз міжнародного досвіду показує, що ефективність інтеграції низькопотенційних джерел визначається не стільки температурою джерела, а перш за все його системною сумісністю з мережею та структурою попиту. Вирішальне значення мають температурні, просторові, часові та експлуатаційні фактори. Джерело з найвищою температурою не обов'язково є оптимальним, а локально доступні ресурси можуть виявитися ефективнішими за потужні віддалені джерела. Для України ця проблема є особливо актуальною через поєднання високотемпературних теплових мереж, значних теплових втрат і наявності потужного потенціалу низькопотенційних джерел – насамперед промислового скидного тепла та стічних вод. Тому найбільш перспективними виглядають гібридні моделі модернізації, які поєднують існуючу централізовану інфраструктуру з локальними вузлами утилізації тепла та тепловими насосами. Саме тому для українських міст більш релевантним є поєднання європейського та китайського підходів, а не повний перехід до низькотемпературних мереж нового покоління.

### Список літератури:

1. Lund H. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems / H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen // *Energy*. – 2014. – Vol. 68. – P. 1-11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
2. Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook: Final Report of IEA DHC Annex TS2 Implementation of Low-Temperature District Heating Systems [Electronic resource] / H. Averfalk et al. – Fraunhofer Verlag, 2021. – 206 p. – Access mode: [https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex\\_TS2/IEA\\_DHC\\_Annex\\_TS2\\_Transition\\_to\\_low\\_temperature\\_DH.pdf](https://www.iea-dhc.org/fileadmin/documents/Annex_TS2/IEA_DHC_Annex_TS2_Transition_to_low_temperature_DH.pdf). – Title from the screen.
3. Werner S. International review of district heating and cooling / S. Werner // *Energy*. – 2017. – Vol. 137. – P. 617–631. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.045.
4. Fujii S. Design and Analysis of District Heating Systems Utilizing Excess Heat in Japan / S. Fujii, T. Furubayashi, T. Nakata // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, Is. 7. – 1202. DOI: 10.3390/en12071202.
5. Fu L. Low Carbon District Heating in China in 2025 – a District Heating Mode with Low Grade Waste Heat as Heat Source / L. Fu, Y. Li, Y. Wu, X. Wang, Y. Jiang // *Energy*. – 2021. – Vol. 230. – 120765. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120765.

УДК 666.97:536.2:66.047

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАДАНИМИ ТЕПЛОФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

К.т.н., доц. Соколовська І.Є., Біліченко К.В.

*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське*  
sokolovskaja7887@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Соколовська І.Є.

Пористі матеріали широко застосовують у теплоенергетиці для захисту установок, агрегатів і будівельних конструкцій. Їх властивості визначаються складом і технологією отримання [1, 2].

Теплофізичні характеристики формуються під дією поверхневих і капілярних сил, а структура регулюється введенням різних добавок, що змінюють заряд і гідрофільність частинок.

У процесі формування та тепломасообміну відбувається перебудова структури (агрегація, дезагрегація), а також набухання і усадка, що змінює пористість і впливає на масоперенесення. Це робить коефіцієнти перенесення залежними не лише від вологості, а й від структури матеріалу. Існуючі технології кремнеземистих теплоізоляційних матеріалів не завжди забезпечують необхідні пористість і термостійкість [2, 3].

Метою дослідження є розробка складу сировинної суміші для замкненопористого теплоізоляційного матеріалу з підвищеною термостійкістю та пористістю, а також удосконалення технології його отримання шляхом оптимізації температурно-часових режимів.

Запропонований спосіб включає подрібнення кремнеземистої сировини і наповнювача, змішування з лужним розчином та пропарювання [4]. Грануляцію і пропарювання проводять при 90–100 °С (70–90 хв), підсушування – при 100–120 °С (10–15 хв), спучування – при 500–550 °С (5–20 хв).

Формування пористої структури визначається температурою та складом середовища. За оптимальної в'язкості газоутворення відбувається рівномірно з утворенням замкнених пор, а під час підсушування (100–120 °С) за рахунок гідратної води, бікарбонату натрію і глини структура стабілізується.

Регулювання температури і часу забезпечує формування пор заданого розміру без їх злиття, а остаточне структурування відбувається при короткочасній термообробці 500–550 °С.

На рис. 1-5 наведено результати лабораторних досліджень міцнісних та теплоізоляційних характеристик нового матеріалу [4] та Сіапору [3].

На рис. 5 показано залежність теплопровідності від температури теплоносія, де визначено оптимальний діапазон 400–500 °С. Підвищення температури вище цього рівня викликає термічний розклад матеріалу, що призводить до зростання теплопровідності та погіршення теплоізоляційних властивостей. Таким чином встановлено зв'язок між характеристиками матеріалу та режимами термообробки.

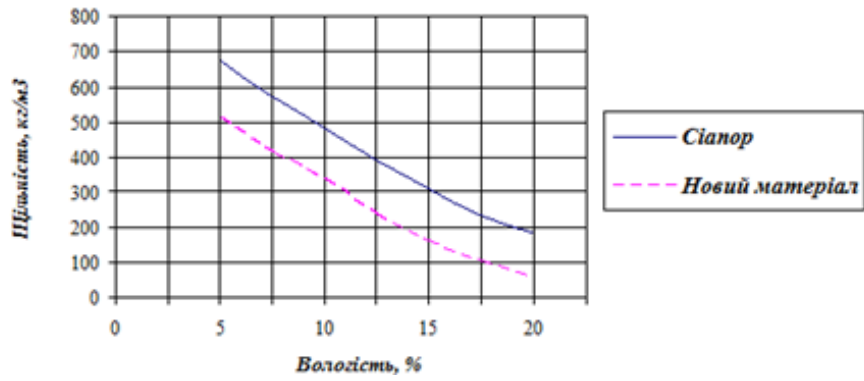


Рисунок 1 – Залежність щільності готових матеріалів від вологості сировини

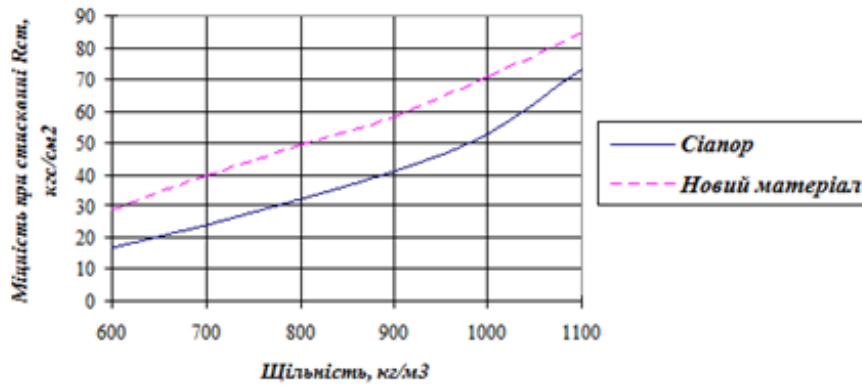


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта міцності при стисканні від щільності матеріалів

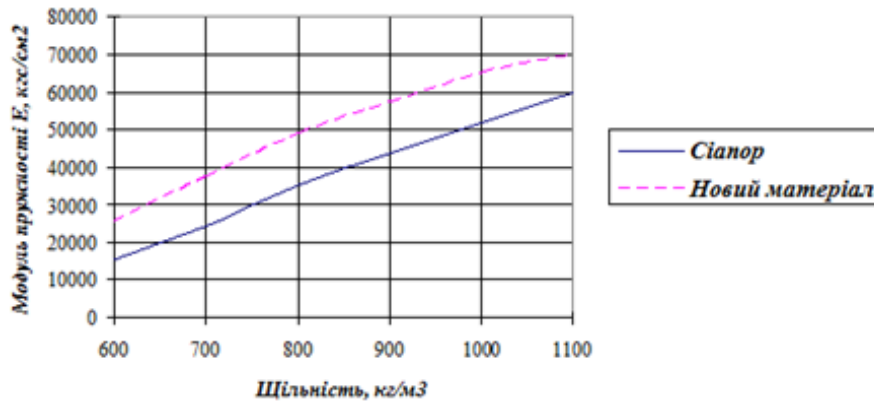


Рисунок 3 – Залежність модуля пружності від щільності матеріалів

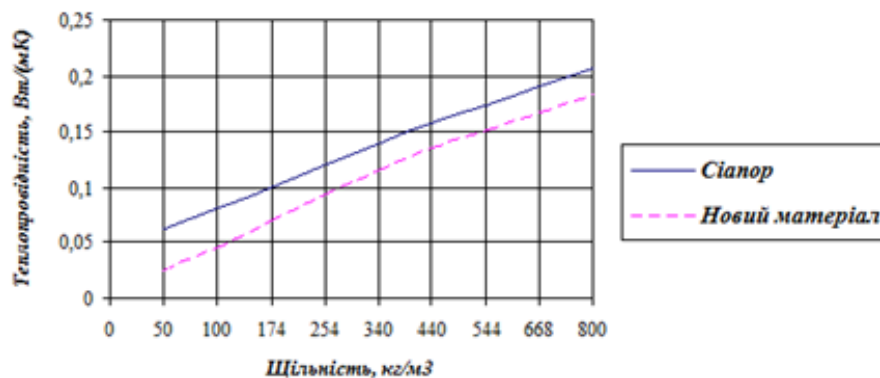


Рисунок 4 – Залежність теплопровідності від щільності матеріалів

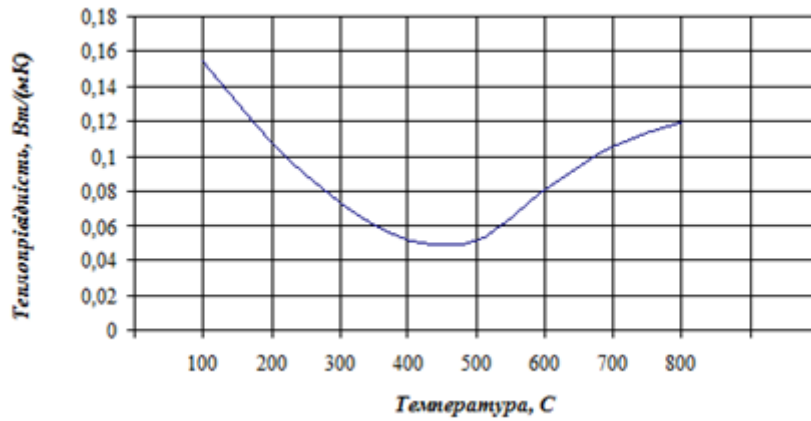


Рисунок 5 – Залежність теплопровідності отриманого нового матеріалу від температури термообробки

Аналіз залежностей (рис. 1–5) показує, що найкращі теплофізичні та міцнісні властивості мають зразки з мінімальною щільністю, сформовані при підвищеній вологості вихідної сировини. Основними факторами, що визначають пористість, міцність і теплопровідність матеріалу, є кінетика сушіння та термообробки, а також температурні режими процесу.

Проведені лабораторні дослідження дозволили обґрунтувати вибір оптимальних температур термообробки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вибір способів інтенсифікації тепломасообміну, моделювання процесів, експериментальну перевірку результатів і розробку методики визначення технологічних та конструктивних параметрів отримання матеріалу.

### Список літератури:

1. Технологія конструкційних матеріалів : підручник / [М.А. Сологуб та ін.]; за ред. М.А. Сологуб. – Київ: Вища шк., 2002. – 374 с.
2. Опекунов В.В. Конструкційно-теплоізоляційні будівельні матеріали на основі активованих сировинних компонентів: Монографія / В.В. Опекунов – Київ: Академперіодика, 2001. – 216 с.
3. Сировинна суміш пористого заповнювача для бетону та спосіб його одержання: пат. 3802 Україна: С04В14/00, С04В20/04, С04В22/06. заявл. 20.10.1992; опубл. 27.12.1994, Бюл. №15. – 6 с.
4. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу і спосіб його одержання: пат. 85285 Україна: С 04В 14/00, С 04В 14/04, С 04В 14/06, С 04В 14/10, С 04В 14/26. № и 2007 03901; заявл. 10.04.2007; опубл. 12.01.2009, Бюл. №1. – 8 с.
5. Соколовська І.Є. Отримання пористих матеріалів з прогнозованими теплофізичними характеристиками / І.Є. Соколовська, В.С. Мись // Збірник наукових праць ДДТУ. – 2023. – № 1(42). – С.134-139. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.42.2023.16>.

УДК 658.26

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Губін А.О., к.т.н., доц. Клімов Р.О.

*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське*

klroma@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Клімов Р.О.

Основна функція систем теплопостачання – забезпечення споживачів теплової енергії відповідно до необхідного графіка теплових навантажень. При цьому рівень електричної потужності, як правило, визначається тепловим навантаженням. Функціональне призначення систем теплопостачання є основою для формування поняття надійності теплопостачання [1].

Аналіз надійності систем теплопостачання необхідно проводити з позицій здатності і виконання заданих функцій. Здатність системи теплопостачання виконувати задані функції визначається її станами з відповідними рівнями потужності, продуктивності і т.д. Відповідно до цього, необхідно розрізняти працездатний стан, часткову відмову і повну відмову системи в цілому [2].

Комбінована система теплопостачання є складною структурою, для якої розрахунок показників надійності є достатньо складним завданням. Тому для розрахунку надійності такої системи теплофікації використовують методи декомпозиції. Це ділення здійснюється за технологічною і функціональною ознаках. Такий підхід дозволяє проводити розрахунок для окремих підсистем незалежно. У основі розрахунку структурної надійності комбінованої енергоустановки лежить опис її функціонування за допомогою марківського процесу з дискретною безліччю станів і безперервним часом.

Проведені розрахунки за розробленою методикою показують, що показники надійності по відпуску теплоти для багатоблокових ТЕЦ істотно вище, ніж для блоку. Наявність поперечного зв'язку на ТЕЦ по колектору пари 1,3 МПа і загального колектора по мережній воді знижує вірогідність невідпуску гарячої води. Наявність редуційно-охолоджувальних установок також забезпечує достатньо високі показники по відпуску теплоти. Враховуючи ту обставину, що теплофікаційні блоки призначені для покриття теплових навантажень, доцільно використовувати структурний і функціональний резерв для підвищення надійності відпуску теплової енергії. Тому необхідно на ТЕЦ мати складнішу в сенсі надійності структурну схему з ширшим застосуванням структурного і функціонального резервування.

### Список літератури:

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств: навч. посіб./ Р.О. Клімов. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 200 с.
2. Канарчук В.Є. Надійність машин: підручник / В.Є. Канарчук, С.К. Полянський, М.М. Дмитрієв. – Київ: Либідь, 2003. – 424 с.

УДК 621.355.9

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ЦЕОЛІТІВ 13X В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ

Гречановський А.П., Тортіка Д.М., Борець С.О.  
*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*  
natvolgusheva@gmail.com  
Науковий керівник: к.т.н., доц. Волгушева Н.В.

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до цеолітових теплоакумуляторів як перспективних систем термохімічного накопичення енергії [1]. Такі акумулятори належать до класу хімічних накопичувачів і здатні забезпечувати високу щільність енергії на рівні 150–200 кВт·год·м<sup>-3</sup>, водночас характеризуючись мінімальними втратами під час тривалого (сезонного) зберігання [2]. Експериментальні дослідження, зокрема для цеоліту типу NaY, підтверджують їх значний потенціал, дозволяючи визначити ключові теплофізичні та кінетичні параметри процесів акумуляування і віддачі теплоти [3]. Визначальною стадією функціонування таких систем є регенерація цеолітів, яка безпосередньо впливає на ефективність їх багаторазового використання. Основною проблемою при цьому залишається забезпечення швидкої та енергоефективної десорбції адсорбованої вологи. Одним із найбільш перспективних підходів до інтенсифікації цього процесу є застосування мікрохвильового нагрівання. На відміну від традиційних конвективних і кондуктивних методів, мікрохвильове опромінення забезпечує об'ємне та селективне нагрівання матеріалу, що сприяє суттєвому скороченню тривалості процесу та підвищенню його керованості [4].

Низька теплопровідність цеолітів (~0,1–0,2 Вт/м·К) обмежує ефективність класичних способів теплопередачі, призводячи до значних температурних градієнтів, подовження часу нагрівання та зниження загальної продуктивності. У випадку мікрохвильової обробки енергоефективність визначається двома основними складовими: коефіцієнтом корисної дії перетворення електричної енергії у мікрохвильове випромінювання та ефективністю перетворення мікрохвиль у теплоту безпосередньо в матеріалі. Якщо перший параметр залежить від характеристик джерела випромінювання (наприклад, магнетрона) і є відносно сталим, то другий значною мірою визначається умовами процесу, властивостями матеріалу та конфігурацією системи. Підвищення цього показника є ключовим фактором покращення економічної доцільності застосування мікрохвильових технологій.

Дослідження енергетичних аспектів мікрохвильової регенерації цеолітів свідчать, що цей метод забезпечує більш швидке, екологічно чисте та менш енергоємне протікання процесу порівняно з традиційними підходами [5]. Важливо, що при цьому не відбувається деградації адсорбційних властивостей матеріалу: експериментальні результати демонструють високу відтворюваність циклів адсорбції–десорбції після мікрохвильової обробки [6].

Незважаючи на велику кількість досліджень, питання кінетики сушіння цеолітів у мікрохвильовому полі та особливостей перерозподілу теплових потоків залишаються недостатньо дослідженими. Особливо це стосується оптимізації режимів обробки для різних типів цеолітів, масштабування процесів та інтеграції таких систем у реальні енергетичні установки. Подальші дослідження в цьому напрямі є необхідними для підвищення ефективності технологій термохімічного накопичення теплоти та їх широкого впровадження в енергетиці, зокрема в системах використання відновлюваних джерел енергії та утилізації низькопотенційного тепла.

Метою роботи є експериментальне дослідження особливостей процесу сушіння цеолітах 13X, частинки яких були різної форми: циліндричної – 13X<sub>ц</sub> та сферичної – 13X<sub>с</sub> у мікрохвильовому полі, зокрема визначення кінетики видалення вологи та оцінка ефективності процесу. Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, схема якої представлена в роботі [7]. Експерименти проведені для маси матеріалу 100 г, вихідна потужність магнетрону 800 Вт. Розрахунки показали, що для обох цеолітів ККД змінювався в межах 24 %– 36 % в залежності від періоду сушіння. Отримано, що ККД мікрохвильового сушіння цеолітів 13X<sub>с</sub> та 13X<sub>ц</sub> практично не відрізняється, тому можна зробити висновок, що форма зерен не впливає на інтенсивність сушіння. Криві зміни вологовмісту та температури за часом наведені на рис. 1.

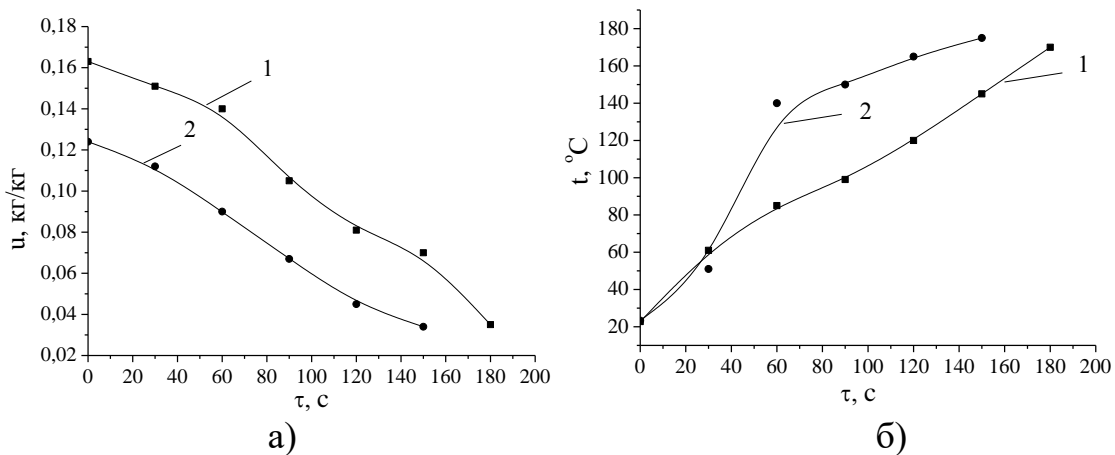


Рисунок 1 – Криві зміни вологовмісту (а) та температури (б) за часом: 1 – цеоліт 13X<sub>с</sub>; 2 – цеоліт 13X<sub>ц</sub>

Аналіз графіків підтверджує, що сам матеріал обраних цеолітів характеризується високими властивостями поглинати мікрохвильову енергію, внаслідок чого навіть при суттєвому зменшенні вологовмісту спостерігається зростання температури. Більш інтенсивне зростання температури цеоліту 13X<sub>ц</sub> в порівнянні з 13X<sub>с</sub> обумовлено меншим початковим вологовмістом, внаслідок чого мікрохвильова енергія менш витрачається на випаровування вологи. Зміна вологовмісту відбувається з однаковою інтенсивністю.

Для визначення впливу товщини шару на ефективність перетворення МХ енергії в теплову були проведені експерименти з шаром цеолітів з тою же

масою (100 г), але з більшою товщиною шару  $\delta=22$  мм за рахунок використання експериментальної комірки меншого діаметра. Отримано, що ККД зросло до 50 %, тобто в 1,7 рази. Це свідчить про важливість раціонального формування шару зі створенням умов для вільного виходу вологи в процесі сушіння. Надмірне збільшення товщини шару призводить до погіршення процесу сушіння внаслідок утруднення виходу вологи із шару, тому необхідно знаходити оптимальну товщину шару з урахуванням його діелектричних характеристик.

В ході досліджень спостерігалось, що цеоліт  $13X_c$  характеризується більшою міцністю в порівнянні з  $13X_d$ . В результаті багаторазового сушіння в МХ полі не виявлено руйнування зерен  $13X_c$ , в той же час в шарі цеоліту  $13X_d$  було виявлено наявність пилу, що свідчить про деяке руйнування зерен. Це пов'язано з різними виробниками та різними технологічними режимами виробництва.

### Список літератури:

1. Calabrese L. Adsorption performance and thermodynamic analysis of SAPO-34 silicone composite foams for adsorption heat pump applications / L. Calabrese, L. Bonaccorsi, P. Bruzzaniti, A. Frazzica, A. Freni, E. Proverbio // *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. – 2018. – Vol. 7, no. 4. – P. 24. <https://doi.org/10.1007/s40243-018-0131-y>.
2. Nonnen T. Erprobung eines thermochemischen Langzeitwärmespeichers auf Basis eines Zeolith/Salz-Komposits / T. Nonnen, S. Beckert, K. Gleichmann, A. Brandt, B. Unger, H. Kerskes, B. Mette, S. Bonk, T. Badenhop, F. Salg, R. Gläser // *Chemie Ingenieur Technik*. – 2016. – Vol. 88, no. 3. – P. 363–371. <https://doi.org/10.1002/cite.201500136>.
3. Rönsch S. Zeolite Heat Storage: Key Parameters from Experimental Results with Binder-Free NaY / S. Rönsch, B. Auer, M. Kinateder, K. Gleichmann // *Chemical Engineering & Technology*. – 2020. – Vol. 43, no. 12. – P. 2530–2537. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000342>.
4. Cherbański R. Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion into Heat / R. Cherbański // *Chemical Engineering & Technology*. – 2011. – Vol. 34, no. 12. – P. 2083–2090. <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
5. Di Palo M. Experimental and Numerical Assessment of a Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications / M. Di Palo, V. Sabatelli, F. Buzzi, R. Gabbrielli // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, no. 23. – P. 8517. <https://doi.org/10.3390/app10238517>.
6. Бошкова І.Л. Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі / І.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Л.З. Бошков, О.С. Бондаренко, А.П. Гречановський // *Refrigeration Engineering and Technology*. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 197–204. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
7. Бошкова І.Л. Вивчення особливостей сушіння цеолітів  $13X$  в мікрохвильовому полі / І.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, А.П. Гречановський, С.О. Борець, Д.М. Тортіка // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Т. 1, № 5. – С. 131–137. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/18>.

УДК 621.181.5:662.62

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОТЛА ПРИ СПАЛЮВАННІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

К.т.н. Романова К.О.<sup>1</sup>, к.т.н. Капустянський А.О.<sup>2</sup>, Правосеров А.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

romanova.kateryna@iik.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н. Романова К.О.

В умовах дефіциту якісного енергетичного вугілля та необхідності забезпечення стабільної роботи теплоенергетичних установок особливої актуальності набуває питання адаптації пилувугільних котлів до роботи на паливі зі зміненими характеристиками. Використання вугілля зі зниженою теплотою згоряння та підвищеним виходом летких речовин може призводити до погіршення економічних показників роботи котлів, збільшення механічного недопалу та порушення температурного режиму роботи обладнання [1, 2]. У зв'язку з цим важливим завданням є оптимізація режимів спалювання палива та оцінка можливості стабільної експлуатації котельних агрегатів без суттєвих конструктивних змін.

Для дослідження режимів роботи енергетичного котла ТП-47 при використанні вугілля погіршеної якості та визначення основних факторів, що впливають на стабільність процесу горіння й ефективність роботи обладнання були проведені режимно-налагоджувальні випробування котельного агрегату в діапазоні навантажень 65–90 % від номінальної теплопродуктивності.

Випробування проводилися на пилувугільному котлі ТП-47 барабанного типу з природною циркуляцією при спалюванні вугілля Донецького басейну погіршеної якості з номінальною теплопродуктивністю котла 354 Гкал/год та температурою перегрітої пари 545 °С. Під час випробувань використовувалося вугілля зі зниженою теплотою згоряння 3800–4500 ккал/кг та підвищеним виходом летких речовин. Дослідження проводилися у діапазоні навантажень від 65 % до 90 % номінальної теплопродуктивності котла. Контроль режимних параметрів здійснювався шляхом вимірювання теплопродуктивності котла, коефіцієнта надлишку повітря, температури перегрітої пари та показників роботи пилосистем. Особливу увагу було приділено оцінці впливу якості палива на теплопродуктивність агрегату, коефіцієнт надлишку повітря, температуру перегрітої пари та роботу пилосистем.

Під час проведення випробувань встановлено, що котел забезпечує стабільну роботу навіть за використання непроектного палива. Середня теплопродуктивність агрегату становила близько 87 % від номінального значення, що становило близько 309 Гкал/год, а температура перегрітої пари підтримувалась у межах допустимих значень. Водночас зафіксовано тенденцію до збільшення коефіцієнта надлишку повітря при зниженні навантаження

котла, що свідчить про необхідність додаткового коригування режимів подачі повітря [3].

Встановлено, що зі збільшенням навантаження котла погіршується якість розмелювання вугільного пилу, що може спричинити зростання втрат теплоти з механічним недопалом. При роботі агрегату на рівні 0,9 від номінального навантаження показник залишку на ситі R90 перевищував рекомендовані значення, що підтверджує необхідність удосконалення процесів паливопідготовки [4].

Крім того, експериментальні дослідження показали, що система автоматичного регулювання температури перегрітої пари характеризується певною інерційністю при зміні режимів роботи. Температура перегрітої пари змінювалася в межах 530–546 °С, що загалом відповідає допустимим експлуатаційним значенням. Це може негативно впливати на стабільність параметрів пари під час різких змін навантаження та вимагає модернізації систем автоматичного керування [5].

Отримані результати підтверджують можливість експлуатації котлів типу ТП-47 на паливі погіршеної якості за умови оптимізації режимів горіння, підтримання раціонального коефіцієнта надлишку повітря та контролю якості пилоприготування. Практичне значення дослідження полягає у підвищенні паливної гнучкості енергетичних установок, зниженні питомих витрат палива та забезпеченні стабільної роботи котельного обладнання в сучасних умовах нестабільної паливної бази [6].

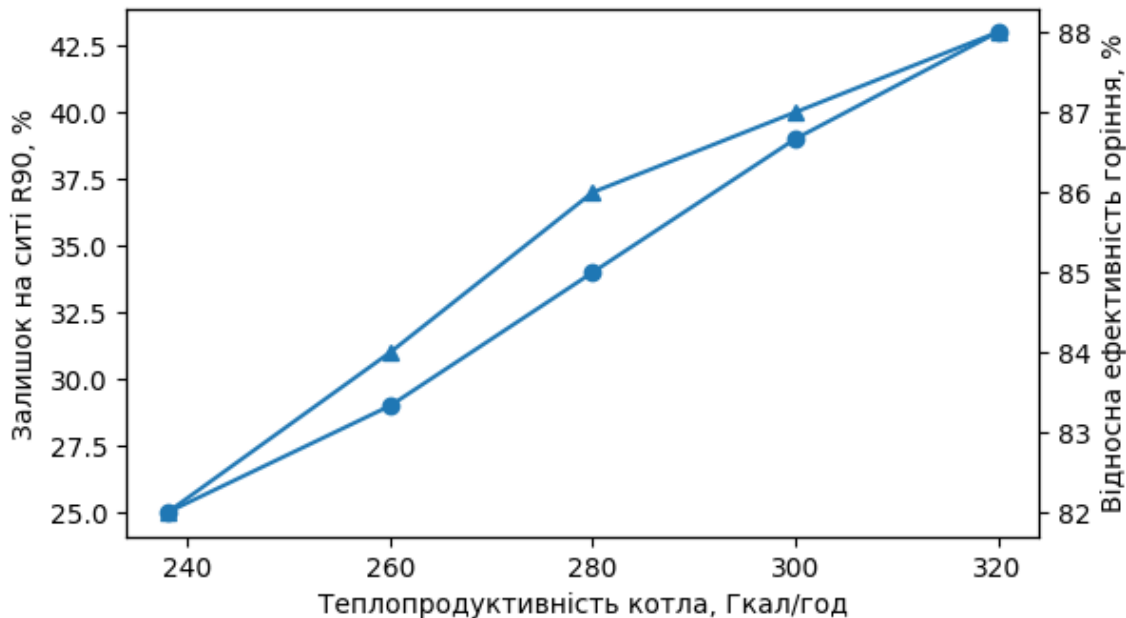


Рисунок 1 – Вплив теплопродуктивності котла на якість помелу палива та ефективність процесу горіння

Як видно на рис.1, зі збільшенням теплопродуктивності котла від 238 до 320 Гкал/год спостерігається суттєве погіршення якості розмелювання палива, що підтверджується зростанням залишку на ситі R90 з 25 % до 43 %. Це свідчить про підвищення навантаження на пилосистеми та зниження

дисперсності вугільного пилу при роботі котла у форсованих режимах. Одночасно простежується незначне підвищення відносної ефективності процесу горіння, однак збільшення крупності пилу може спричинити зростання механічного недопалу та додаткові втрати теплоти.

Отримані результати підтверджують необхідність оптимізації режимів пилоприготування та підтримання раціонального співвідношення між навантаженням котла і якістю помелу палива.

### **Список літератури:**

1. Варламов Г.Б. Вплив характеристик непроектного твердого палива на показники надійності та економічності роботи котельного устаткування / Г.Б. Варламов, А.О. Капустянський // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. – №1. – С. 90-98.

2. Kravets T. Enhancement of technical and economic indicators of power-generating units of thermal power plants by eliminating flue gas recirculation / T. Kravets, Y. Miroshnychenko, A. Kapustianskyi // Energy Engineering and Control Systems. – 2021. – Vol. 7, No. 1. – P. 26-31.

3. Капустянський А.О. Вугільна теплова генерація України в сучасних умовах курсу на декарбонізацію/ А.О. Капустянський, К.О. Романова // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. – Київ, 2023. – С. 200-201.

4. Kapustyanskii A.A. Study of flame combustion of off-design binary coal blends in steam boilers / A.A. Kapustyanskii // Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 64. – P. 534-541.

5. Чернявський М.В. Розробка методів приготування суміші антрациту з газовим вугіллям та її пиловидне спалювання / М.В. Чернявський, О.Ю. Провалов, І.В. Безценний, О.В. Моїсеєнко // Енерготехнології та ресурсозбереження. – 2016. – №4. – С. 3-13.

6. Variny M. Advances in Biomass Co-Combustion with Fossil Fuels in the European Context: A Review / M. Variny, A. Varga, M. Rimár, J. Janošovský, J. Kizek, L. Lukáč, G. Jablonský, O. Mierka // Processes. – 2021. – Vol. 9, Is. 1. – 100.

УДК 620.97.004.18:621.18

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОТЕЛЕНЬ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ШЛЯХОМ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ В УМОВАХ БЛЕКАУТІВ**

Куріленко С.В., PhD, ас. Беднарська І.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

В умовах військових дій, техногенних аварій чи природних катаклізмів енергетична інфраструктура стає особливо вразливою, що часто призводить до тривалих відключень електроенергії – блекаутів [1]. Це створює серйозні загрози для стабільного теплопостачання об'єктів критичної інфраструктури, зокрема лікарень, безперебійна робота яких є життєво необхідною. Для забезпечення часткової автономності під час аварійних ситуацій та економії палива актуальним стає залучення вторинних енергоресурсів (ВЕР), найбільш доступним з яких на котельнях є теплота відхідних димових газів [2, 3].

Об'єктом дослідження є котельня обласної клінічної лікарні, обладнана газовим водогрійним котлом потужністю 1 МВт з коефіцієнтом корисної дії 90%.

Аналіз режимів роботи показав, що при витраті газу 110 м<sup>3</sup>/рік температура димових газів на виході становить 160 °С, що свідчить про те, що значна частина теплоти просто втрачається в довкілля. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано схему модернізації із встановленням конденсаційного економайзера-утилізатора у хвостовій частині котла [4].

Особливістю такого підходу є глибока утилізація тепла: використовується як явне тепло (за рахунок зниження температури газів), так і приховане тепло пароутворення, що виділяється під час конденсації водяної пари, яка міститься в продуктах згоряння [5]. Утилізована енергія спрямовується на попередній підігрів зворотної мережевої води перед її подачею у котел [6].

Розрахунок теплового балансу підтвердив високу ефективність запропонованого заходу. Встановлення рекуператора дозволяє повернути до системи близько 60% тепла, що зазвичай втрачається, зменшивши втрати теплоти з відхідними газами більш ніж у 2,5 рази (з 46,7 кВт·год до 18,7 кВт·год). Кількість корисної теплової енергії, що повертається до системи теплопостачання, становить 28,0 кВт·год.

У результаті впровадження цієї технології забезпечується пряма економія природного газу на рівні 3,0 м<sup>3</sup> за кожну годину роботи котла. В умовах кризових ситуацій та обмежених лімітів палива цей збережений ресурс дозволяє суттєво збільшити тривалість автономної роботи котельні [7].

Отже, впровадження систем використання ВЕР є не просто технічним рішенням, а стратегічним заходом, що підвищує енергетичну автономність,

економічну ефективність та стійкість медичних закладів до непередбачуваних відключень електрики.

### **Список літератури:**

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р.
2. Закон України «Про енергетичну ефективність» № 1818-IX від 21.10.2021. Відомості Верховної Ради України. 2021. № 2, ст.8.
3. Басок Б.І. Вторинні енергетичні ресурси та їх використання: навч. посіб. / Б.І. Басок, Т.О. Єтту. – Київ: Наукова думка, 2018. – 245 с.
4. Directive (EU) 2018/2002 of European Parliament and of Council of 11 December 2018 Directive 2012/27/EU on energy efficiency // Official Journal of the European Union. – 2018. – Vol. 61, L 328. – 234 p.
5. Danish Energy Agency. District Heating in Denmark: Lessons from Technology Leader. Copenhagen, 2020.
6. Дешко В.І. Енергетичний менеджмент та енергоефективність: Навчальний посібник / В.І. Дешко, О.М. Шевченко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 215 с.
7. Карп І.М. Використання теплоти відхідних газів теплогенеруючих установок / І.М. Карп, Є.Є. Нікітін // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2015. – № 4. – С. 12-19.

UDC 621.311

## **MEASURES TO IMPROVE THE ECONOMIC AND OPERATIONAL PERFORMANCE OF A POWER UNIT**

PhD (Engineering), associate professor Pugachova T.M.,  
Savoniuk M.V.

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv*  
tatpch@ukr.net

Supervisor: PhD (Engineering), associate professor Pugachova T.M.

The technical retrofitting of existing thermal power plants (TPPs) is a key approach to improving the technological level of the electric power industry, as well as the efficiency and reliability of energy supply. Many engineering solutions incorporated into the original design have become outdated and no longer meet modern requirements for reliability and cost-effectiveness. Turbines that have reached the end of their allowable service life are subject to retrofitting, particularly through the replacement of high-temperature components and parts with new ones, in order to extend the service life of the entire turbine unit by 25–30 years.

One of the ways to improve the efficiency and reliability of turbine operation is the enhancement and modernization of axial-radial shroud seals of the rotor blades in the high-pressure cylinder (HPC) and intermediate-pressure cylinder (IPC). The objective of the retrofit is to increase the efficiency of the HPC and IPC while simultaneously improving reliability by reducing the likelihood of rotor-to-stator contact at increased radial clearances, as well as by mitigating the factors that lead to the emergence of unsteady aerodynamic forces and low-frequency rotor vibrations.

Axial-radial seals are practically not subject to wear; their implementation improves maintainability and eliminates the need for additional time-consuming restoration of sealing fins, which is typically required for radial seals. The formation of sealing fins on the blade shrouds can be achieved in two ways: either by build-up welding on the blade shrouds using argon arc welding, or by welding strips onto them using the same argon arc welding process [1].

The modernization of overband seals can be carried out during an overhaul [2].

The scope of reconstruction work includes:

- surfacing of sealing ridges on the diaphragm crowns;
- welding of strips onto the blade bands;
- machining of diaphragms and rotors to form sealing ridges.

During turbine operation, insufficient reliability of the steam supply and extraction system from end seals has been identified. As the sealing fins wear, this manifests in steam leakage, oil contamination with condensate, and distortion of the seal chambers in the intermediate- and low-pressure cylinders (IPC and LPC). To eliminate these deficiencies, two separate supply headers (high-pressure and low-pressure) are arranged for the high-temperature rotor ends (HPC and the front end seals of the IPC) and the low-temperature rotor ends (rear end seals of the IPC and LPC). At the high-temperature ends, the “self-sealing” principle is applied; that is,

under steady-state turbine operation, steam is extracted from all seal chambers of the HPC and the front end seals of the IPC. Steam is supplied to these seals only during start-up, shutdown, and load rejection conditions.

An effective way to improve turbine maneuverability is the application of a flange heating system. The overall heating system comprises two independent subsystems designed for heating the flanges and the studs of the high-pressure cylinder and the medium-pressure cylinder, respectively, which can operate either simultaneously or separately. The flange heating system of the high-pressure cylinder includes two symmetrical heating lines for the right and left sides of the cylinder. The source of heating steam is the governing stage chamber. The heating scheme of the medium-pressure cylinder consists of two symmetrical circuits for heating the right and left sides of the cylinder. Depending on layout feasibility, the steam source is provided by bypass pipes supplying steam to the side control valves of the medium-pressure cylinder.

Modernization of the turbine end sealing system improves the efficiency of the turbine unit by reducing the amount of sealing steam supplied from an external source. It also enhances the reliability and maneuverability of turbine operation during start-ups, shutdowns, and load rejections by automatically maintaining pressure in the sealing chambers during transitions from steam supply to steam extraction and vice versa.

The technical and economic effect of modernizing the overband seals of the high- and medium-pressure turbine cylinders is as follows [3]:

- increase in the efficiency of the high-pressure cylinder (HPC) by 1.5–2.0 %;
- estimated increase in turbine power by 1.5–2.0 MW;
- payback period of up to six months;
- reduction in costs for the repair and restoration of overband seals during major overhauls.

### **References:**

1. Pugachova T.M. Improvement of Methods for Increasing the Service Life of Steam Turbines: Collective Monograph / T.M.Pugachova, O.V. Koshelnik, O.V. Krugliakova, V.G. Pavlova, O.V. Dolobovskay // Kharkiv: Madrid Printing House. – 2021. – 105 p.
2. Pugachova T.M. Some Issues in the Reconstruction and Modernization of Steam Turbines at Thermal Power Plants of Ukraine / T.M. Pugachova, M.I. Mamontov // Vestnik NTU 'KhPI'. – 2008. – № 6. – P. 152-161.
3. Pugachova T.M. Energy-Saving Technologies in Thermal Power Engineering [Electronic Resource]: Textbook / T.M.Pugachova, O.V. Koshelnik, O.V. Krugliakova, V.G. Pavlova. – Kharkiv, 2023. – 166 p.

УДК 658.26

## ПРИГОТУВАННЯ ТЕПЛОНОСІЇВ ДЛЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ НА ОСНОВІ ЕМУЛЬСІЙ

Трубник А.О., к.т.н., доц. Клімов Р.О.

*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське*  
klroma@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Клімов Р.О.

Теплоносієм для опалення може бути будь-яке рідке або газоподібне середовище, яке має теплоакумулюючу спроможність, а також рухоме та дешеве [1]. Теплоносій повинен відповідати вимогам які пред'являються до опалювальних установок. Зазвичай для опалення будівель в якості теплоносіїв використовують воду, водяну пару, гаряче повітря, димові гази та термостійкі рідкі органічні та неорганічні сполуки (антифризи, тосоли, хладони та ін.). Для систем, що працюють періодично і при існуванні небезпеки замерзання теплоносія, тобто для захисту автономних мереж від розморожування при аварійних відключеннях електроенергії, як теплоносій необхідно застосовувати воду з домішками, що знижують температуру кристалізації. Як незамерзаючий теплоносій часто використовується широкий спектр водних сумішей на основі моноетиленгліколю з комплексними присадками, що забезпечують стабільність властивостей, низьку корозійну активність, антиспінювання, антиокиснювальні властивості і безнакипний режим роботи системи [1]. Дані суміші є емульсійними середовищами, для набуття певних властивостей яких необхідна витрата достатньо великих кількостей енергії. При цьому необхідно отримувати стабільну емульсію, яка може бути використана як теплоносій тривалий період часу.

При розгляді процесів дроблення рідких крапель в емульсіях важливою є стійкість краплі до дії сил, які прагнуть її зруйнувати [2]. Представлені в літературних джерелах розрахунки в більшості випадків ґрунтуються на критеріях Бонда і Вебера, при цьому жодна існуюча модель не розглядає процес дроблення дисперсної фази з урахуванням формування парового прошарку на межі розділу двох фаз і силової взаємодії відносно декількох одночасно закипаючих частинок дисперсної фази. Детальне вивчення даних процесів дозволить визначити найбільш вигідні в економічному і екологічному плані параметри для їх реалізації.

### Список літератури:

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств: навч. посіб./ Р.О. Клімов. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 200 с.
2. Klimov R. Force interaction of boiling dispersed emulsion particles / R. Klimov // Journal of new technologies in environmental science. – 2018. – No. 2, Vol. 29. – P. 60-67.

УДК 666.97:66.047:621.9

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ВИХРОВОГО АПАРАТУ ДЛЯ ОБРОБКИ СИРОВИНИ

К.т.н., доц. Соколовська І.Є., Гончаров Я.Р.

*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське*

sokolovskaja7887@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Соколовська І.Є.

Сучасний розвиток виробництва будівельних матеріалів характеризується зростанням вимог до енергоефективності та якості теплоізоляційної продукції. Властивості матеріалів значною мірою визначаються параметрами термічної обробки сировини, зокрема процесами сушіння та випалу, під час яких формуються структура, щільність і теплофізичні характеристики [1, 2].

Перспективним напрямом інтенсифікації цих процесів є використання вихрових тепломасообмінних апаратів [3], що забезпечують інтенсивні закручені потоки, високі коефіцієнти тепло- і масоперенесення та рівномірний температурний розподіл. Це сприяє скороченню тривалості обробки та зниженню енергетичних витрат.

Ефективність таких апаратів значною мірою залежить від їх конструктивних параметрів, які визначають газодинамічну структуру потоку. Нераціональні рішення можуть призводити до застійних зон, нерівномірного прогріву та перевитрат енергії.

Аналіз сучасних досліджень показує, що оптимізація конструктивних характеристик вихрових апаратів для термічної обробки сировини теплоізоляційних матеріалів залишається недостатньо вивченою. Особливої уваги потребує встановлення зв'язку між геометрією апарату та ефективністю тепломасообміну [1, 2, 4].

Удосконалення конструкції вихрового апарату є актуальним завданням, спрямованим на інтенсифікацію процесів, зниження енерговитрат і забезпечення стабільної якості матеріалів. Це потребує детального аналізу газодинаміки, зокрема розподілу швидкостей і тиску, які визначають інтенсивність теплообміну.

Для дослідження газодинамічних процесів застосовано чисельне моделювання у тривимірній постановці [4], що дозволило виявити недоліки конструкції. Зокрема, при односторонньому підведенні теплоносія формується циркуляційна зона, яка порушує рівномірність руху частинок, збільшує час їх перебування в апараті та знижує однорідність термічної обробки і якість продукту.

Для підвищення ефективності термічної обробки сировини теплоізоляційних матеріалів запропоновано модернізацію апарату шляхом введення додаткового тангенційного патрубку підведення теплоносія без зміни інших елементів конструкції (рис. 1) [5]. Це забезпечує більш

симетричне формування закрученого потоку та покращує умови руху частинок.

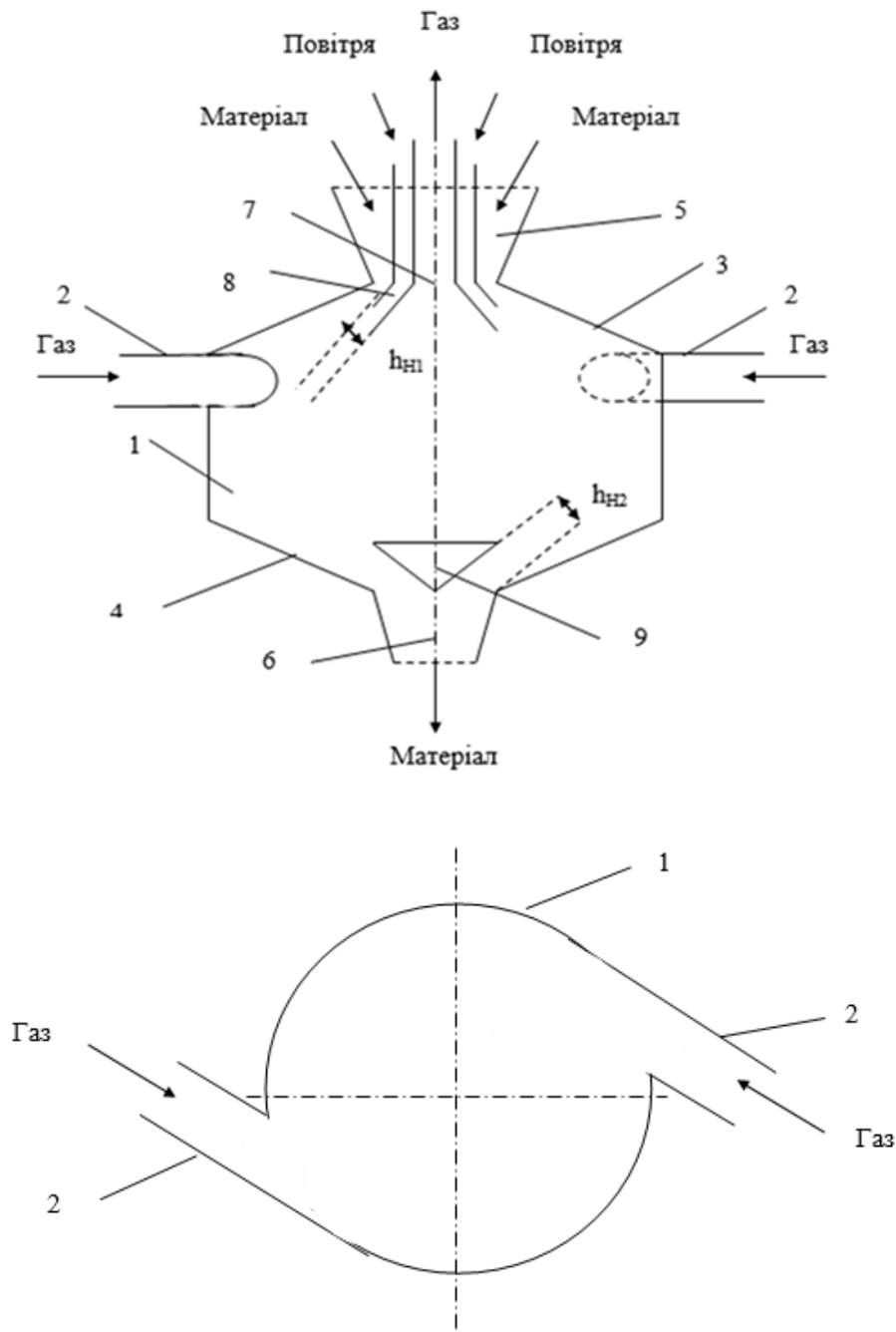


Рисунок 1 – Схема вихрового сушильного апарату з двома тангенційними патрубками [5]:

1 – корпус сушильного апарату; 2 – вхідні тангенційні патрубки для подачі теплоносія; 3 – верхня поверхня сушильного апарату; 4 – нижня поверхня сушильного апарату; 5 – бункер завантаження матеріалу; 6 – бункер вивантаження матеріалу

Результати чисельного моделювання [4] показали зменшення або усунення циркуляційних зон, що сприяє рівномірному розподілу теплоносія і матеріалу та інтенсифікації процесу. Запропонована конструкція забезпечує більш однорідну термічну обробку і підвищує якість готового продукту.

Формування симетричного та більш однорідного поля швидкостей створює сприятливі умови для ефективнішого керування процесами тепломасообміну між потоком теплоносія та частинками оброблюваного матеріалу. Завдяки стабілізації структури закрученого потоку з'являється можливість більш точно регулювати тривалість перебування частинок у зоні інтенсивної термічної дії, що дозволяє керувати ступенем їх прогріву та параметрами обробки залежно від фізико-механічних і теплофізичних характеристик матеріалу.

Крім того, використання двох симетрично розташованих потоків теплоносія забезпечує більш раціональний розподіл енергії в апараті та дозволяє знизити швидкість газових потоків на вході порівняно з конструкцією з одним тангенціальним патрубком за збереження однакової інтенсивності теплообміну. Це сприяє зменшенню гідравлічних втрат, зниженню енерговитрат на транспортування теплоносія та підвищенню загальної енергоефективності процесу, одночасно забезпечуючи стабільність руху частинок і покращення умов їх теплової обробки.

Завдяки введенню другого тангенціального підведення формується збалансоване обертальне поле швидкостей, що сприяє рівномірнішому розподілу гідродинамічних параметрів по перерізу апарату (рис. 2).

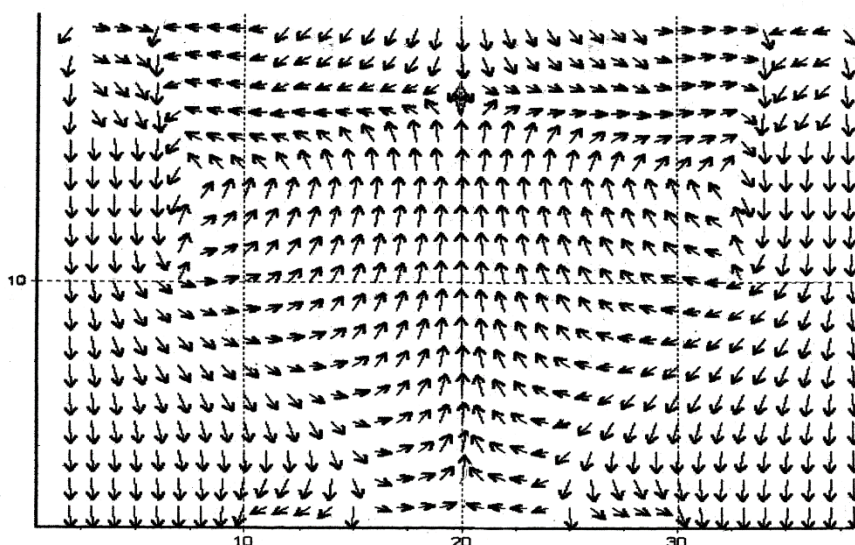


Рисунок 2 – Поля напрямків проєкцій швидкостей газу в осьовому перетині вихрового апарату з двома патрубками [5]

Така організація руху потоку дозволяє суттєво зменшити інтенсивність циркуляційних і застійних зон, характерних для конструкцій з одностороннім введенням теплоносія, які призводять до локального порушення відцентрового руху частинок. Усунення цих небажаних зон забезпечує стабілізацію траєкторій руху матеріалу та більш прогнозований характер взаємодії фаз у процесі обробки.

В результаті модернізації забезпечується підвищення стабільності відцентрового руху частинок матеріалу, зменшення нерівномірності часу їх

перебування в робочому об'ємі апарата та інтенсифікація процесів тепломасообміну. Це створює передумови для більш повного врахування змін гранулометричного складу матеріалу, його густини та теплофізичних властивостей у процесі обробки. Як наслідок, досягається більш однорідна термічна й масообмінна обробка сировини, підвищується якість гранульованого наповнювача теплоізоляційного матеріалу та покращується керованість технологічного процесу. Запропоноване конструктивне удосконалення дозволяє підвищити ефективність функціонування апарата без істотного збільшення енерговитрат і ускладнення конструкції, що забезпечує можливість його впровадження під час модернізації існуючих промислових установок.

Запропонований пристрій забезпечує більш рівномірну та інтенсивнішу, порівняно з прототипом, теплообробку матеріалу як у межах усього робочого об'єму апарата, так і для кожної окремої частинки. Це дозволяє підвищити керованість процесом спучування вихідної сировини, забезпечити зростання продуктивності приблизно на 25 % та знизити енергетичні витрати на 20–30 % завдяки зменшенню гідродинамічного опору та більш раціональному використанню енергії потоку теплоносія.

### Список літератури:

1. Klimov R. Study of Heat Treatment Processes in the Production of Porous Thermal Insulation Materials / R. Klimov, I. Sokolovska, P. Dašić // Karabegovic I., Kovačević A., Mandzuka S. (eds). *New Technologies, Development and Application VII*. – 2024. – Vol. 1069. – P. 603-610. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_61).

2. Klimov R. Optimization of the heat treatment processes of porous thermal insulation materials / R. Klimov, I. Sokolovska, O. Hluschenko // *Functional Materials*. – 2024. – Vol. 31, No. 2. – P. 285–289. <https://doi.org/10.15407/fm31.02.285>.

3. Пристрій для отримання гранульованого наповнювача теплоізоляційного матеріалу : пат. 26821 Україна : МПК F26B 17/10 / А.М. Павленко, І.Є. Соколовська, Г.В. Кошлак, Р.А. Клімов; заявник і патентовласник Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № u200705035; заявл. 07.05.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.

4. Соколовська І.Є. Математична модель газодинаміки потоків у вихровому апараті / І.Є. Соколовська, Є.Д. Крицький // *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. – 2025. – №1 (46). – С. 134–139. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.46.2025.15>.

5. Пристрій для отримання гранульованого наповнювача теплоізоляційного матеріалу: пат. 155869 Україна: МПК F26 B 17/10 / І.Є. Соколовська, Р.О. Клімов, С.Є. Самохвалов; заявник і патентовласник Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № u202303257; заявл. 04.07.2023; опубл. 17.04.2024, Бюл. №16.

УДК 536.24:621.18

## РОЛЬ ЗАХИСНОГО ШАРУ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕЦ 500 МВт

Нікульшин В.Ю., к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: PhD, ас. Беднарська І.С.

Надійність теплової ізоляції енергоблоків потужністю 500 МВт значною мірою залежить від цілісності зовнішнього захисного покриття (кожуха). В інженерній практиці кожух часто розглядається лише як декоративний чи допоміжний елемент. Проте аналіз експлуатаційних відмов свідчить, що саме механічне пошкодження або неякісний монтаж захисного покриття є першопричиною (тригером), що запускає ланцюгову реакцію прискореної деградації всього ізоляційного масиву [1].

Захисний кожух виконує роль первинного бар'єру, який забезпечує:

- гідроізоляцію (запобігає потраплянню атмосферної вологи та технологічних рідин у пористу структуру матеріалу);
- аеродинамічну стабільність (захист волокнистого матеріалу від вимивання (ерозії) потоками повітря);
- механічний захист (приймання навантажень при обслуговуванні обладнання та захист від випадкових ударів);
- стабілізацію геометричної форми (утримання ізоляційних матів у проектному положенні, запобігаючи їх розширенню чи провисанню).

Дослідження технічного стану обладнання ТЕЦ на реальному енергоблоці виявило, що деградація системи ізоляції спричиняється за наступними механізмами: розгерметизація стиків, конвективний винос енергії, втрата механічної підтримки.

Нещільне прилягання листів покриття або відсутність заклепок у місцях з'єднань створює умови для проникнення вологи. При зволоженні лише на 5 % коефіцієнт теплопровідності волокнистих матеріалів може зростати у 2-3 рази [2].

Пошкодження кожуха на тлі високої різниці температур створює ефект «димиходу». Зовнішнє повітря, потрапляючи під кожух, інтенсивно охолоджує поверхню обладнання, одночасно вимиваючи частинки зруйнованого вібрацією волокна [1, 2].

Деформація металевих листів призводить до локального здавлювання ізоляції, що спричиняє її ущільнення та формування «теплових містків» безпосередньо на місці контакту кожуха з гарячою поверхнею [3].

Встановлено, що термін служби теплової ізоляції при цілісному кожусі відповідає розрахунковим показникам (10-15 років). Однак при появі наскрізних пошкоджень покриття швидкість деградації матеріалу зростає

експоненціально [3]. Локальне пошкодження площею лише у кілька квадратних сантиметрів за 1-2 опалювальні сезони може призвести до повної втрати ізоляційних властивостей на ділянці на кілька метрів через зволоження та гравітаційне зміщення матів.

Отже, захисний кожух є визначальним фактором довговічності теплової ізоляції ТЕЦ. Для забезпечення енергоефективності блоків 500 МВт необхідно впровадити жорсткий регламент контролю герметичності покриття, особливо у зонах вібраційного навантаження. Потрібно використовувати посилені кріплення та герметизуючі вставки у вузлах, що піддаються термічним розширенням. Рекомендуємо розглядати відновлення цілісності кожуха як першочерговий захід, що дозволяє законсервувати поточний стан ізоляції та запобігти її капітальному руйнуванню.

### Список літератури:

1. Chetehouna K. Investigation on the thermal degradation and kinetic parameters of innovative insulation materials using TGA-MS / K. Chetehouna, N. Belayachi, B. Rengel, D. Hoxha, P. Gillard // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 81. – P. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.037>.
2. Zheng C. Mechanism and kinetics of thermal degradation of insulating materials developed from cellulose fiber and fire retardants / C. Zheng, D. Li, M. Ek // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2019. – Vol. 135. – P. 3015–3027. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7564-5>.
3. Leem Y. Long-term stability and water vapor induced degradation of physico-chemical properties of XPS and PF / Y. Leem, R. Kitagaki, T. Ishida, H. Hagihara // *Developments in the Built Environment*. – 2024. – Vol. 18. – 100429. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100429>.

УДК 66.047.3:66.045.1:537.86

## ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГІЇ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ У ПРОЦЕСІ СПІКАННЯ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ НА ЕТАПІ СУШІННЯ

Крятов А.Г., Кравченко Є.О., Воробйов Н.О.

*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

barsiccc@gmail.com

Науковий керівник: д.т.н., проф. Дорошенко В.М.

При застосуванні енергії мікрохвильового поля на стадії сушіння під час виробництва технічної кераміки режим і тривалість обробки можуть істотно відрізнятись від класичної [1]. Мікрохвильове сушіння дозволяє уникнути спучування, розтріскування, розшарування та вибухового руйнування заготовки [2]. Якщо розчинник не видалити до початку інтенсивного нагрівання, при швидкому випаровуванні всередині зразка виникає високий паровий тиск, що призводить до дефектів виробу. Існує потреба у всебічному розгляді явищ, пов'язаних з обробкою матеріалів мікрохвильовим випромінюванням, зокрема сушіння. Робота спрямована на визначення доцільності застосування мікрохвильового нагріву в технології спікання технічної кераміки на основі порошку  $Al_2O_3$  зі зв'язувальною речовиною – полівініловим спиртом (ПВС) – на етапі сушіння та дебайдингу.

Для визначення характеру зміни середньоінтегральних вологовмісту і температури в процесі сушіння для кожного матеріалу проводили серію з трьох дослідів з зразками з однаковими масами, початковим вологовмістом і розмірами комірки, але при різній тривалості сушіння (у кожному наступному досліді матеріал витримувався в камері довше на інтервал часу). Після закінчення кожного дослідів зразок виймали з камери і вимірювали температуру і масу. Вимірювання температури здійснювалося за допомогою пірометра. Потім зразок зважували для визначення його маси в кінці процесу сушіння. Аналогічні серії дослідів проводили і при інших розмірах, масах, початкових вологовмістах зразка, потужності магнетрона.

Дослідження процесу сушіння оксиду алюмінію з ПВС проведені при різних значеннях маси загрузки матеріалу  $m$  – від 10 г до 100 г, товщини шару  $\delta$  – від 7 мм до 15 мм, площі поверхні зразка  $F$  – від 0,00078 м<sup>2</sup> до 0,0083 м<sup>2</sup>, вихідної потужності магнетрону  $P_{вих}$  – від 180 до 400 Вт. Отримані дані були основою отримання даних по кінетиці сушіння та визначення ефективності перетворення мікрохвильової енергії в теплову. Типові первинні дані наведені в табл. 1. При досягненні максимальної температури волога практично видалена і далі мікрохвильова енергія дедалі менше поглинається матеріалом. Як показують температурні криві, після досягнення максимальної температури температура зразків знижується, причому темп охолодження залежить від завантаження. Частка поглиненої мікрохвильової енергії знижується, а частка енергії, що йде у навколишнє середовище, збільшується.

**Результати дослідження процесу сушіння зразка  $Al_2O_3+PVC$  в мікрохвильовому полі.  $\delta=8$  мм;  $P_{вих} = 240$  Вт;  $m = 0,07$  кг**

$\tau, c$	$\Delta m \cdot 10^3, кг$	$\bar{u}, кг/кг$	$\bar{t}, ^\circ C$
0	0	0,455	21
30	0,3	0,443	103
60	1,1	0,364	165
90	0,9	0,322	165
120	1,9	0,220	156
150	1,6	0,106	148
180	0,7	0,029	136
210	0,1	0,017	129
240	0	0	123

Експерименти довели, що при сушінні зразків масою від 10 г до 40 г навіть при потужності 180 Вт якість зразків є незадовільною: спостерігались тріщиноутворення, а при  $m=10$  г – навіть активне розкладання та обвуглювання органічного сполучного PVC. Після розкладання PVC вуглець, що утворюється починає активно поглинати мікрохвильову енергію, в результаті спостерігалось стрибкоподібне нагрівання і руйнування зразка.

Аналіз стану зразків показав, що темп нагріву від 1,87 К/с (питома потужність мікрохвильового поля 2,4 Вт/г) до 4,07 К/с (питома потужність мікрохвильового поля 24 Вт/г) у перші 30 с не призводить до погіршення якості кінцевого виробу. Далі для всіх зразків спостерігалася ділянка постійної швидкості сушіння, для якої характерна незначна зміна температури. Після цього періоду вимикався магнетрон, щоб не допустити розкладання PVC. Таким чином, сушіння досліджуваного матеріалу має проходити менш інтенсивно. Отримано, що при завантаженні семи однакових зразків масою 100 г темп нагрівання становив 0,14 К/с, питома потужність мікрохвильового поля  $P=0,24$  Вт/г. Огляд літератури показав, що при нагріванні в мікрохвильовому полі до 80-120 °С видаляється адсорбована волога, на рівні температур 250-300 °С відбувається активне розкладання полівінілового спирту, обвуглювання та виділення газів [3]. Характер зміни ККД камери від відносного об'єму матеріалу описується залежністю (1), отриманої на підставі обробки експериментальних даних:

$$\eta_k = 0,78 \left( 1 - \frac{3,87}{4,34 + e^{11 \cdot 2V_m/V_k}} \right), \quad (1)$$

де  $V_k$  – об'єм МХ камери, м<sup>3</sup>,  $V_m$  – сумарний об'єм матеріалу.

Після стадії сушіння необхідне етап дебайдингу, тобто видалення PVC. Оскільки  $Al_2O_3$  практично не поглинає мікрохвильове випромінювання, недоцільно використовувати мікрохвильове поле. Слід застосовувати інші способи нагрівання. Цей процес має бути дуже повільним та контрольованим. Рекомендована схема дебайдингу з вентиляцією представлена у табл. 2.

**Рекомендована схема дебайдингу з вентиляцією**

Етап	Температура	Швидкість	Тривалість
I	120 – 165 °С	0,14 К/с	1 год.
II	200 – 300 °С	0,5–1 К/с	1–2 год.
III	300 – 500 °С	0,7–1 К/с	1 год.

Після 500 °С органіка повністю видалена. Рекомендується робити витримки (плато) за 200–250 °С і за 350–400 °С, що дозволяє газам виходити без розриву структури. Пропонований режим: 20 – 150 °С – видалення вологи (темп нагріву – 0,14 К/с), 150 – 300 °С – початок розкладання сполучного (темп нагріву – 0,5 К/с), 300 – 500 °С – повне випалювання органіки (темп нагріву – 0,7 К/с).

**Список літератури:**

1. Nait-Ali B. Perspectives in drying of ceramics / B. Nait-Ali, A. Alzina, N. Lauro, D.S. Smith // *Open Ceramics*. – 2024. – Vol. 17. – P. 100554. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100554>.
2. Ghorbel I. Numerical and experimental study of the heating of alumina under microwave field in hybrid configuration. Application to sintering / I. Ghorbel. – Université de Lyon, 2021. – 145 p.
3. Baklouti S. Binder burnout and evolution of the mechanical strength of dry-pressed ceramics containing poly(vinyl alcohol) / S. Baklouti, J. Bouaziz, T. Chartier, J.-F. Baumard // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2001. – Vol. 21, no. 8. – P. 1087–1092. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(00\)00305-8](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(00)00305-8).

УДК 536.24:621.18

## **ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА ДЕГРАДАЦІЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕЦ**

PhD, ас. Беднарська І.С., Богдан А.О.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Надійна робота теплоелектроцентралеї значною мірою залежить від стану допоміжних систем, зокрема теплової ізоляції. В умовах реальної експлуатації ізоляційні конструкції піддаються комплексному впливу низки негативних факторів: циклічних температурних навантажень, вібрацій, механічних пошкоджень та впливу вологи. Дослідження енергоблоків ТЕЦ потужністю 500 МВт показує, що руйнування ізоляції не є наслідком дії якогось одного фактора, а виступає результатом їхньої одночасної (синергетичної) дії.

В цій роботі розглядається факторний аналіз руйнівних впливів температури, вібрацій, вологості на деградацію теплоізоляційних матеріалів.

Деградація теплоізоляційних матеріалів (зокрема волокнистих) відбувається під впливом трьох основних експлуатаційних факторів. Перший такий фактор - це термічний фактор тобто температурні навантаження. Високі температури теплоносія є першопричиною термічного старіння матеріалів. Особливо інтенсивно ці процеси виявляються при температурах понад 200-300 °С, за яких спостерігається часткова втрата пружних властивостей матеріалу та його структурна дестабілізація [1]. Наслідком термічного старіння є втрата механічної міцності волокон та зростання загальної теплопровідності матеріалу [2].

Другий фактор – це вібраційний фактор: енергетичне обладнання ТЕЦ працює в умовах постійних вібраційних навантажень, які суттєво інтенсифікують процеси руйнування ізоляції порівняно з лабораторними умовами. Вібрації спричиняють поступове руйнування структури матеріалу, зміщення та просідання ізоляційних шарів. Через вібраційні коливання порушується герметичність стиків ізоляційних конструкцій, що відкриває шлях для дії інших негативних факторів.

Третій важливий фактор – це вплив вологи та механічні пошкодження. Порушення цілісності зовнішнього захисного кожуха (через механічні впливи чи корозію) є ініціюючим фактором, що відкриває доступ для вологи [3]. Проникнення вологи всередину ізоляційного шару призводить до швидкого зволоження матеріалу, різкого збільшення його теплопровідності та прискорення деградаційних процесів.

Додатково, розгерметизація покриття на тлі вібрацій призводить до механічного виносу (видування) волокон потоками навколишнього повітря та

формування відкритих поверхонь з інтенсивним тепловиділенням.

Узагальнення експериментальних даних термографічних обстежень дозволило встановити, що взаємодія описаних факторів формує процес самоприскорювальної деградації [4].

Процес розгортається за таким сценарієм: початкові дефекти (наприклад, пошкодження кожуха) дозволяють волозі та вібрації інтенсивно руйнувати структуру матеріалу (просідання, ущільнення) [5]. Це формує локальні зони підвищеної теплопередачі («теплові містки»). Зростання локальних теплових втрат призводить до підвищення температурного навантаження на прилеглі ділянки матеріалу, що, в свою чергу, посилює процеси його термічного руйнування та розширює зону дефекту.

**Висновки.** Деградація теплоізоляційних матеріалів на ТЕЦ має яскраво виражений багатофакторний характер. Ключовими чинниками руйнування виступають високі температури, вібрації та волога, які діють одночасно і взаємно посилюють негативний вплив один одного. Розуміння цих механізмів та закономірностей локалізації дефектів дозволяє ідентифікувати типові зони підвищеного ризику, що є необхідною умовою для розробки дієвих заходів з підвищення надійності та енергоефективності ізоляційних систем.

### Список літератури:

1. Jiang H. Experimental investigation on performance degradation of insulation materials induced by freeze–thaw cycles and its applications / H. Jiang, E. Wang, F. Niu, H. Han, X. Liu, Z. Ren // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 350 (3). – 128844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128844>.
2. Ahmed A. Investigation on the thermal degradation, moisture absorption characteristics and antibacterial behavior of natural insulation materials / A. Ahmed, A. Qayoum // *Mater Renew Sustain Energy*. – 2021. – Vol. 10. – 4. <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00188-8>.
3. Chetehouna K. Investigation on the thermal degradation and kinetic parameters of innovative insulation materials using TGA-MS / K. Chetehouna, N. Belayachi, B. Rengel, D. Hoxha, P. Gillard // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 81. – P. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.037>.
4. Zheng C. Mechanism and kinetics of thermal degradation of insulating materials developed from cellulose fiber and fire retardants / C. Zheng, D. Li, M. Ek // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2019. – Vol. 135. – P. 3015–3027. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7564-5>.
5. Лементар С.Ю. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції / С.Ю. Лементар, І.С. Беднарська, Д.В. Риндюк // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. – 2021. – № 5 (32). – С. 159-167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>.

UDC 669.162.23

## **ANALYSIS OF PHASE-CHANGE MATERIALS FOR CHECKERWORK IN REGENERATIVE AIR HEATERS OF GLASS-MELTING FURNACES**

PhD, Associate Professor Koshelnik O.V., Kirsanov O.Yu., Ohrenchuk O.O.  
*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv*  
Oleksandr.Koshelnik@khipi.edu.ua  
Scientific adviser: PhD, Associate Professor Koshelnik O.V.

Increasing the temperature of combustion air in regenerative heat exchangers used in glass-melting furnaces is one of the most effective strategies for reducing fuel consumption and improving thermal efficiency in high-temperature glass manufacturing [1]. Heat losses through flue gases in such installations can reach up to 40%, which necessitates the modernization of heat recovery systems. The main objective of such improvements is to increase the amount of heat that can be recovered from the gases using regenerative devices, without substantially increasing their overall dimensions or flow resistance in the furnace gas path.

One of the promising solutions is the use of heat storage elements incorporating phase-change materials. Their key feature lies in exploiting the latent heat of fusion. However, selecting suitable materials for such inserts is a challenging task due to the severe operating conditions in regenerator checkerwork. At present, inorganic compounds such as sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) and barium sulfate ( $\text{BaSO}_4$ ), in combination with magnesite- and periclase-based refractories, have found practical application in high-temperature installations. These combinations are already being studied and implemented in blast furnace air heaters, demonstrating high resistance to cyclic thermal loading and stability at elevated temperatures.

The evaluation of the feasibility of using materials for fusible inserts in heat storage elements requires mathematical modeling of complex heat transfer processes under quasi-steady operating conditions of regenerative heat exchangers. Therefore, definitive conclusions regarding the effectiveness of modernization and the optimal selection of materials can only be drawn on the basis of additional experimental investigations, which will allow consideration of the full range of factors determining the operational performance and reliability characteristics of such constructions.

### **References:**

1. Koshel'nik A.V. Improvement of efficiency of regenerative heat exchangers for glass-melting furnaces / A.V. Koshel'nik, T.N. Pugachova, O.V. Kruglyakova, V.G. Pavlova, O.V. Dolobovskaya // Glass and Ceramics. – 2019. – № 1-2. – P. 68-71.

УДК 536.24:621.18

## **КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ВУЗЛІВ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

К.т.н., доц. Шелешей Т.В., Яценко С.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: PhD, ас. Беднарська І.С.

В умовах реальної експлуатації теплоелектроцентралею стан теплової ізоляції часто не відповідає нормативним вимогам навіть після проведення капітальних ремонтів [1]. Дослідження реальних енергоблоків потужністю 500 МВт показує, що це зумовлено не лише експлуатаційним старінням самих матеріалів, а й недосконалістю конструктивних рішень для складних геометричних вузлів. Практичний аналіз фактичного технічного стану обладнання засвідчив, що саме такі вузли є найбільш критичними та вразливими ланками ізоляційної системи [2].

Результати інструментального обстеження дозволили встановити, що найінтенсивніші процеси деградації відбуваються у вузлах зі складною геометрією. До таких «слабких місць» насамперед належать: фланцеві з'єднання та компенсатори; запірно-регулююча арматура; зони паровпуску турбін, лючки-лази та ревізійні отвори.

Головна проблема полягає в тому, що забезпечення суцільності ізоляційного шару на таких ділянках є технологічно ускладненим ще на етапі первинного монтажу. Крім того, специфіка експлуатації цих вузлів потребує періодичного демонтажу їх ізоляції для проведення планових ремонтних робіт чи технічного обслуговування.

Щодо механізмів експлуатаційної деградації вузлів. На практиці доведено, що після повторного монтажу ізоляції на складних вузлах часто не забезпечується відновлення її первинної геометрії та необхідної щільності укладання матеріалу. Як наслідок, саме у цих зонах формуються типові дефекти: утворення неізольованих або лише частково ізольованих ділянок; нерівномірна товщина ізоляційного шару; порушення щільності прилягання ізоляційного матеріалу безпосередньо до поверхні обладнання [2, 3].

Локальні дефекти є системною загрозою. У більшості випадків дефекти на фланцях чи арматурі розглядаються просто як локальні відхилення. Проте системний аналіз доводить інше: ці складні геометричні вузли не просто втрачають енергію локально, вони формують найбільш інтенсивні теплові втрати і виступають як осередки прискореної деградації для всієї прилеглої ізоляційної системи [4, 5]. Тобто вони можуть бути визначальними факторами у формуванні загального рівня деградації ізоляції на всьому трубопроводі.

Висновки. Деградація теплоізоляції енергетичного обладнання має

локалізований, але закономірний і системно повторюваний характер. Оскільки саме арматура, фланцеві з'єднання та компенсатори є основними зонами формування дефектів, кардинальне підвищення енергоефективності вимагає перегляду інженерних підходів до їх проектування та ізолювання. Розробка інноваційних, технологічних при монтажі та легкознімних конструкцій для цих вузлів є пріоритетним завданням для забезпечення довговічності ізоляційних систем ТЕЦ.

### Список літератури:

1. Ryndyuk D.V. Modeling of steam gas dynamics in main pipelines of nuclear power plants / D.V. Ryndyuk, I.S. Bednarska // Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University series «Technical Sciences». – 2024. – № 4. – P. 260-264.
2. Chetehouna K. Investigation on the thermal degradation and kinetic parameters of innovative insulation materials using TGA-MS / K. Chetehouna, N. Belayachi, B. Rengel, D. Hoxha, P. Gillard // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 81. – P. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.037>.
3. Zheng C. Mechanism and kinetics of thermal degradation of insulating materials developed from cellulose fiber and fire retardants / C. Zheng, D. Li, M. Ek // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2019. – Vol. 135. – P. 3015–3027. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7564-5>.
4. Akin F. The effect of thermal aging on solid insulating materials: A case study for dielectric loss and dissipation factor based evaluations under different voltage levels and frequencies / F. Akin, O. Arian // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol.148. – 107222. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107222>.
5. Leem Y. Long-term stability and water vapor induced degradation of physico-chemical properties of XPS and PF / Y. Leem, R. Kitagaki, T. Ishida, H. Hagihara // Developments in the Built Environment. – 2024. – Vol. 18. – 100429. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100429>.

UDC 621.438.9; 621.565.9

## ENERGY CONVERSION COMPLEX FOR POWER AND COOLING GENERATION

PhD, Associate Professor Koshelnik O.V., Egorova O.Yu.

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv*

Oleksandr.Koshelnik@khipi.edu.ua

Scientific adviser: PhD, Associate Professor Koshelnik O.V.

Artificial cooling at industrial plants is primarily generated by compression refrigeration machines. Cooling can also be obtained using steam-jet and absorption refrigeration machines, which utilize the latent heat of flue gases or water vapor. Some enterprises have installed lithium bromide refrigeration system that use the heat of gases from the heating furnaces of sheet rolling mills to produce cold.

As an alternative, let us consider the possibility of generating cold using an absorption system with a hydrogen-powered thermosorption compressor. A refrigeration system that uses hydrogen as a working fluid is a cyclic system that exchanges heat with three heat sources of varying temperature potential, namely  $T_H < T_M < T_L$ . The role of the hot source ( $T_H$ ) is performed by the flue gases discharged from boilers or industrial furnaces, while the role of the cold source ( $T_L$ ) is fulfilled by the refrigeration chamber. As the cold source with intermediate temperature ( $T_M$ ), the medium that cools the adsorber and the hydrogen after desorption is considered. Taking into account that the lower temperature  $T_L$  and the intermediate temperature  $T_M$  are determined by the respective temperatures of the refrigeration chamber and the cooling water source, the only parameter that can be varied in this scheme is the temperature of the hot source.

The main functional element of the refrigeration system design is the thermosorption metal-hydride compressor. In this unit, as a result of the thermal interaction of the metal hydride with the exhaust flue gases, the heat  $Q_g$  is converted into the energy of compressed hydrogen at the desorption temperature  $T_{des}$ . To obtain a lower temperature potential of the refrigerant (hydrogen), it is necessary to ensure the cooling of the compressed hydrogen.

In this system, it is rational to obtain cooling through adiabatic expansion from the temperature level  $T_1 < T_{des}$  down to the level  $T_1 = T_0$ . As a result, both mechanical energy and cooling capacity can be produced. In the refrigeration chamber, the temperature  $T_H$  is maintained by the heating of hydrogen. After regeneration, hydrogen at temperature  $T_3$  is supplied to the corresponding stage of the thermosorption compressor (TSC), where hydrogen sorption takes place. A necessary condition for the process is the removal of heat to the cooling medium with a temperature  $T_M < T_{sorb}$ . In the second stage of the compressor, upon the supply of heat, isobaric heating of the hydride occurs, followed by hydrogen desorption, thereby closing the cycle.

УДК 536.24:621.18

## **АНАЛІЗ СТРУКТУРНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ВОЛОКНИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ**

К.т.н., доц. Шелешей Т.В., Лугвіна В.А.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: PhD, ас. Беднарська І.С.

Ефективність традиційних теплоізоляційних систем на базі мінераловатних та скловолокнистих матів визначається здатністю їхнього просторового каркасу утримувати нерухоме повітря, яке виступає головним теплоізолятором. Проте результати обстеження енергетичного обладнання свідчать, що з часом відбувається необоротна структурна деградація самого матеріалу [1]. Це призводить до суттєвої зміни його первинної морфології та погіршення теплотехнічних характеристик навіть за умови збереження цілісності зовнішнього захисного покриття [2].

Ключовим механізмом внутрішньої деградації є втрата матеріалом своїх початкових пружних властивостей. Цей процес особливо інтенсифікується на ділянках з робочими температурами понад 200-300 °С [2]. Під тривалою дією високих температур відбувається поступове «вигорання» органічних або полімерних сполучних речовин, що утримують волокна разом. У результаті каркас втрачає свою просторову жорсткість та структурну стабільність, а матеріал стає схильним до незворотніх деформацій [3].

Після дестабілізації каркаса на перший план виходять процеси морфологічної зміни ізоляційної кулі [3]. Під тривалою дією власної ваги матеріалу та циклічних температурних деформацій (розширення-стиснення металу трубопроводів) починається гравітаційне зміщення волокон. Відбувається так зване просідання теплоізоляції, що супроводжується зменшенням її ефективної товщини [4]. Найбільш виражено цей ефект спостерігається на вертикальних ділянках паропроводів гострої пари теплових електричних станцій [2]. У нижніх частинах конструкції відбувається значне механічне ущільнення волокон, тоді як у верхніх зонах утворюються неконтрольовані повітряні порожнини [4, 5].

Описані структурні зміни докорінно змінюють теплофізику процесу ізоляції. У зонах ущільнення матеріалу різко скорочується обсяг защемленого повітря. Натомість щільний контакт оголених волокон між собою ініціює формування суцільних провідних ланцюгів. Такі зони локального руйнування волокнистої структури діють як «теплові містки» (або містки холоду), через які відбувається пряма і надзвичайно інтенсивна передача теплової енергії шляхом кондукції крізь тверду фазу [5]. Внаслідок цього ефективна теплопровідність ізоляційної конструкції в цілому швидко зростає.

**Висновки.** Структурна деградація волокнистої ізоляції в енергетичних установках є об'єктивним матеріалознавчим процесом, що полягає у термічній дестабілізації пружного каркаса з подальшим гравітаційним просіданням та ущільненням волокон. Зменшення пористості матеріалу призводить до формування теплових містків та нерівномірного розподілу температурних полів. Підвищення довговічності таких систем потребує розробки нових ізоляційних матеріалів із термічно стійкими з'єднувальними або застосування опорно-розвантажувальних елементів усередині конструкції, які запобігатимуть осіданню масиву під власною вагою.

#### Список літератури:

1. Choi HJ. A Study on Variation of Thermal Characteristics of Insulation Materials for Buildings According to Actual Long-Term Annual Aging Variation / HJ. Choi, JS. Kang, JH. Huh // *International Journal of Thermophysics*. – 2018. – Vol. 39. – 2. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2318-3>.
2. D'Agostino D. Experimental Study on the Performance Decay of Thermal Insulation and Related Influence on Heating Energy Consumption in Buildings / D. D'Agostino, R. Landolfi, M. Nicolella, F. Minichiello // *Sustainability*. – 2022. – 14(5). – 2947. <https://doi.org/10.3390/su14052947>.
3. Jiang H. Experimental investigation on performance degradation of insulation materials induced by freeze–thaw cycles and its applications / H. Jiang, E. Wang, F. Niu, H. Han, X. Liu, Z. Ren // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 350 (3). – 128844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128844>.
4. Ahmed A. Investigation on the thermal degradation, moisture absorption characteristics and antibacterial behavior of natural insulation materials / A. Ahmed, A. Qayoum // *Mater Renew Sustain Energy*. – 2021. – Vol. 10. – 4. <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00188-8>.
5. Chetehouna K. Investigation on the thermal degradation and kinetic parameters of innovative insulation materials using TGA-MS / K. Chetehouna, N. Belayachi, B. Rengel, D. Hoxha, P. Gillard // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 81. – P. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.037>.

УДК 666.97:536.2:66.047.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ПОРИСТОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

К.т.н., доц. Соколовська І.Є., Цветков А.О.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

sokolovskaja7887@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Соколовська І.Є.

Область застосування теплоізоляційних матеріалів залежить від їхніх теплофізичних і механічних властивостей, які взаємопов'язані. Механічні властивості визначають поведінку матеріалу при деформації та руйнуванні під дією навантажень і температурних напружень.

Запропонований у роботах [1–3] спосіб отримання пористого теплоізоляційного матеріалу включає: подрібнення кремнеземистого матеріалу і наповнювача, змішування з водним розчином гідроксиду лужного металу, пропарювання суміші (90–100°C, 70–90 хв), грануляцію, підсушування гранул (100–120°C, 10–15 хв) і їх спучування (500–550°C, 5–20 хв).

Експериментально встановлено, що ключовими факторами кінетики газоутворення і формування пористої структури є температура та склад середовища. Спучування за оптимальних пластично-в'язких властивостей суміші з газоутворювачами забезпечує рівномірне виділення газу та утворення замкнутих пор.

При попередньому підсушуванні гранул повітрям (100–120 °C) інтенсифікується газоутворення за рахунок гідратної води, бікарбонату натрію і глини. Зростання в'язкості матеріалу врівноважує тиск у газових бульбашках. Процес регулюється температурою і тривалістю нагріву для формування пор заданого розміру без їх злиття та втрати форми. Внутрішні поверхні стабілізуються поверхневими силами і тиском, зовнішні – утворюють суцільну плівку. Параметри термообробки визначають пористість, розмір пор, міцність і термостійкість матеріалу. Остаточне структурування відбувається при короткочасному нагріві 500–550 °C (спучування). На рис. 1–6 показано вплив температури і тривалості нагріву на його властивості.

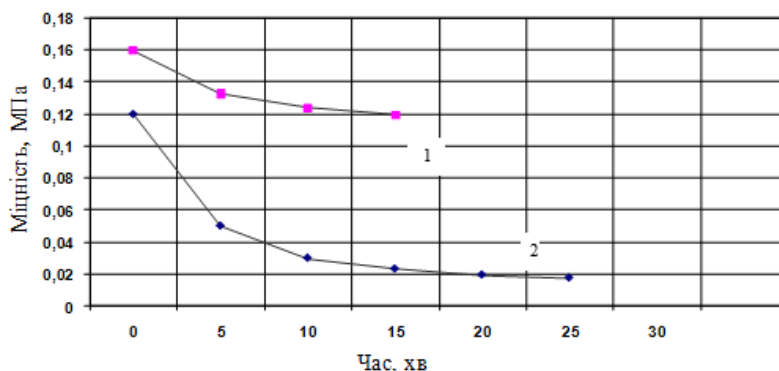


Рисунок 1 – Залежність міцності матеріалу від часу попереднього підсушування (крива 1) та спучування (крива 2)

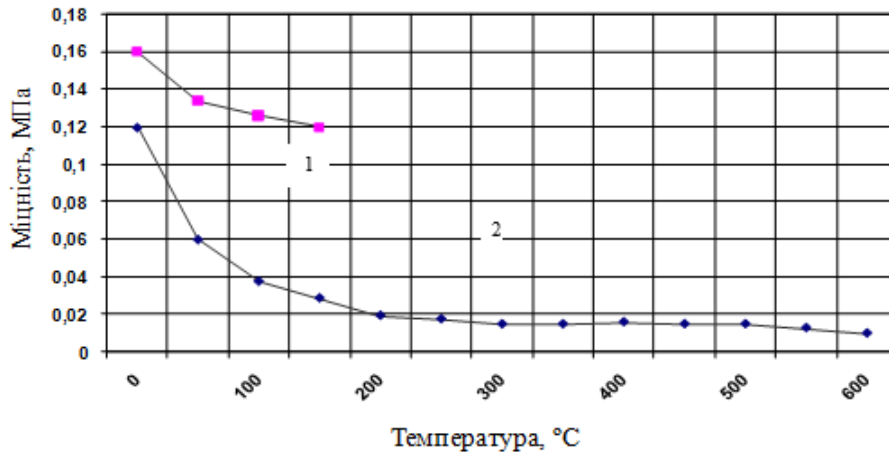


Рисунок 2 – Залежність міцності від температури попереднього підсушування (крива 1) та спучування (крива 2)

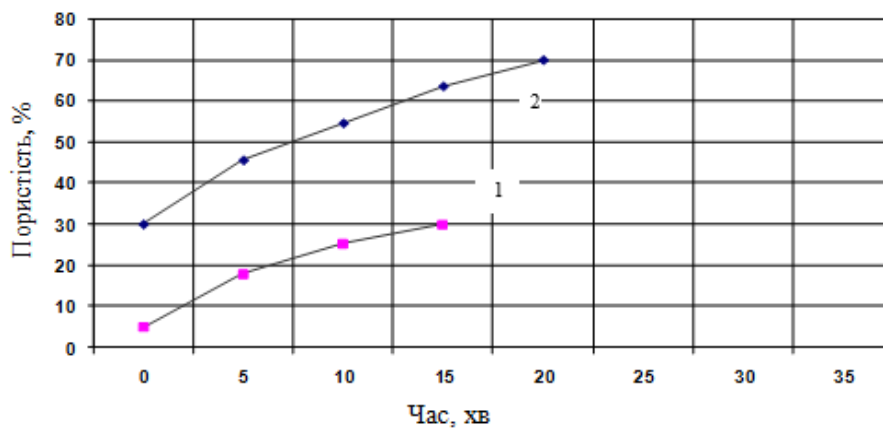


Рисунок 3 – Залежність пористості матеріалу від часу попереднього підсушування (крива 1) та спучування (крива 2)

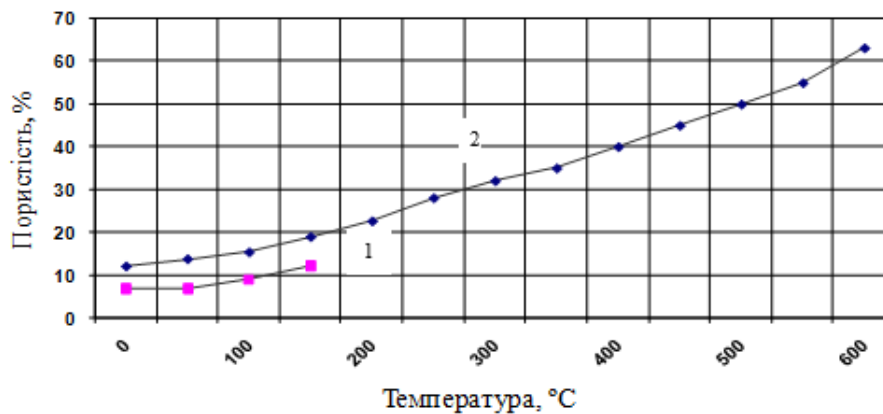


Рисунок 4 – Залежність пористості матеріалу від температури попереднього підсушування (крива 1) та спучування (крива 2)

З наведених залежностей видно, що зі зростанням тривалості й інтенсивності температурного впливу міцність матеріалу знижується, пористість зростає, а теплопровідність зменшується. Отже, для отримання потрібних властивостей необхідно підібрати оптимальний режим обробки.

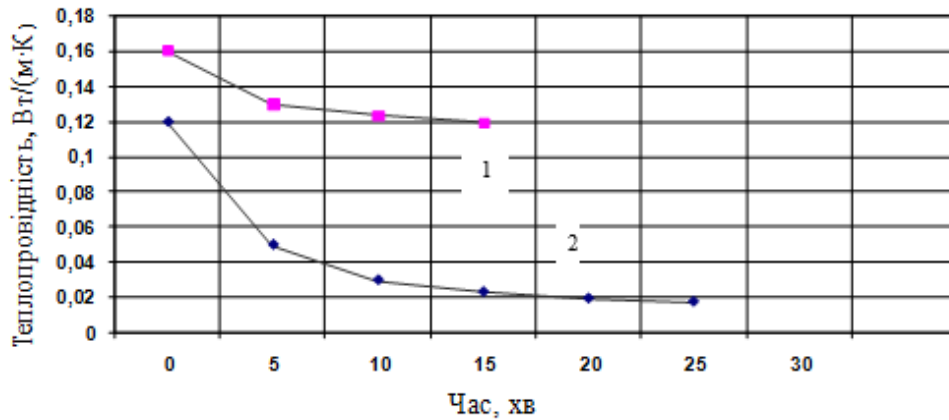


Рисунок 5 – Залежність теплопровідності матеріалу від часу попереднього підсушування (крива 1) та спучування (крива 2)

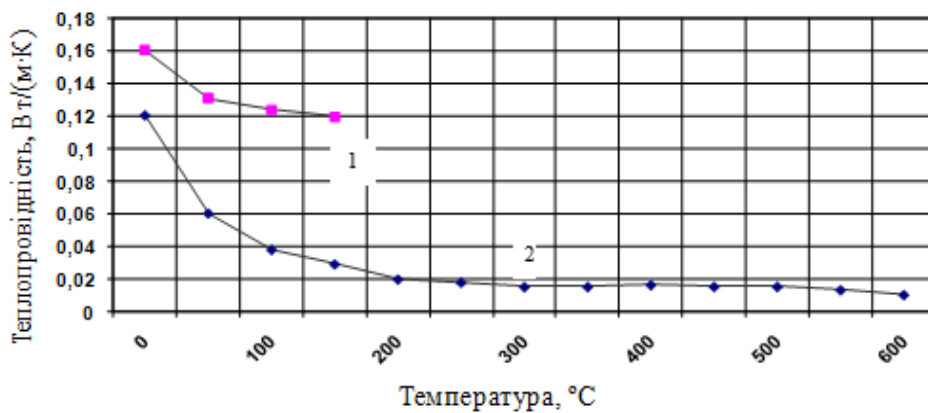


Рисунок 6 – Залежність теплопровідності матеріалу від температури попереднього підсушування (крива 1) та спучування (крива 2)

### Список літератури:

1. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу: пат. 25862 Україна: МПК С 04 В 14/00. / Кошлак Г.В., Павленко А.М., Соколовська І.Є.; заявник та патентовласник Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – № 2007 03899; заявл. 10.04.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. №13.
2. Сировинна суміш для пористого теплоізоляційного матеріалу і спосіб його одержання: пат. 85285 Україна: МПК С 04В 14/00, С 04В 14/04, С 04В 14/06, С 04В 14/10, С 04В 14/26. / Кошлак Г.В., Павленко А.М., Соколовська І.Є.; заявник та патентовласник Дніпродзерж. держ. техн. ун-т – № 2007 03901; заявл. 10.04.2007; опубл. 12.01.2009, Бюл. №1.
3. Соколовська І.Є. Дослідження кінетики теплової обробки пористого теплоізоляційного матеріалу / І.Є. Соколовська // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2018. – № 2 (33). – С.63-66. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.33.2018.200>.

УДК 631.362:662.997

## РОЗРОБКА ЗЕРНОСУШАРКИ З ГІБРИДНОЮ СИСТЕМОЮ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Єрохін Д.М.

*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

erokhin-dima@ukr.net

Науковий керівник: д.т.н., проф. Бошкова І.Л.

На даний час в умовах, коли використання одного джерела енергії є недостатньо ефективним, спостерігається перехід до гібридних енергетичних систем, що пропонують чистіші альтернативи генерації на основі викопного палива та забезпечують більшу надійність порівняно з традиційними системами [1]. Гібридні енергетичні системи здатні підвищити техніко-економічні показники та надійність енергосистем, забезпечуючи маневрування потужністю для компенсації непостійної електрогенерації від відновлювальних джерел енергії [2]. Створення зерносушарок з гібридним теплопостачанням є доцільним та ефективним, часто знижуючи споживання енергії до 80% та покращуючи якість сушіння. Поєднуючи теплові насоси з допоміжними джерелами, такими як біомаса або сонячна енергія, ці системи досягають вищої ефективності та коротшого, більш економічно ефективного часу обробки, ніж звичайні електричні обігрівачі. Попит на ефективний метод сушіння серед фермерів зріс через необхідність зменшення значних втрат, що виникають внаслідок неадекватного сушильного обладнання. Дослідження [3] підтверджують доцільність використання гібридних систем сушіння на прикладі сонячної рисової сушарки фіксованої продуктивності, інтегрованої з фотоелектричним джерелом живлення, яке забезпечує необхідну потужність для інтегрованих компонентів, окрім сонячного колектора та теплової трубки, а також джерела живлення для альтернативної системи нагрівання води. Прототип гібридної зерносушарки був розроблений, виготовлений та зібраний на кафедрі сільськогосподарської та біоресурсної інженерії [4], сушарку оцінювали з використанням зерна кукурудзи та показали високу ефективність сушіння. Відзначається [5], що споживання тепла в існуючих зерносушарках потребує зменшення, тому розроблено заходи щодо зниження теплоспоживання на процес сушіння, серед яких доцільно використовувати теплові насоси, що комплексно вирішують проблему енергоефективності.

Метою даної роботи було конструювання зерносушарки з гібридною системою теплопостачання, яка складалась з теплового насосу та сонячного повітряного підігрівача. Робота зерносушарки з гібридною системою теплопостачання, що поєднує тепловий насос і сонячний повітряний підігрівач, ґрунтується на використанні відновлюваних джерел енергії та утилізації тепла відпрацьованого повітря. Такий підхід дозволяє підвищити енергоефективність процесу сушіння зерна, зменшити витрати енергії та забезпечити більш стабільні технологічні умови сушіння. Процес роботи зерносушарки

починається з подачі атмосферного повітря до сонячного повітряного підігрівача. У цьому пристрої повітря нагрівається під дією сонячної радіації. Сонячний колектор перетворює енергію сонячного випромінювання на теплову, внаслідок чого повітря, проходячи через канал колектора, підвищує свою температуру. Залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та конструкції колектора температура повітря може підвищуватися до 30–60 °С. Попередній підігрів повітря, що надходить до випарника теплового насоса, сприяє збільшенню коефіцієнта перетворення (COP) та зниженню споживання електричної енергії [6]. Після попереднього нагріву повітря надходить до системи теплового насоса, а саме до його конденсатора. Тепловий насос працює за замкненим холодильним циклом, у якому циркулює холодоагент.

Особливу увагу приділено дослідженню роботи сонячного повітряного підігрівача. Остаточний вигляд експериментальної установки з каналами для повітря довжиною 500 мм з пластикових труб наведений на рис. 1.



Рисунок 1 – Експериментальна установка для дослідження ефективності роботи сонячного повітряного підігрівача

Для проведення експериментальних досліджень впливу прозорого покриття на ефективність повітряного сонячного колектора в роботі були використані три види матеріалів: високоякісне віконне скло товщиною 3 мм, прозорий стільниковий полікарбонат товщиною 4 мм та текстурований прозорий полістирол товщиною 2,5 мм. Результати експериментального дослідження пропускної спроможності різних типів прозорого покриття та коефіцієнтів ефективності повітряного сонячного колектора наведені в табл. 1. Сумарна інтенсивність сонячного випромінювання після проходження через скло практично не залежить від співвідношення прямої та розсіяної складових і залишається на рівні коефіцієнта пропускання 0,78–0,79. Натомість для полікарбонату спостерігається погіршення характеристик зі зміною погодних умов: зі збільшенням частки розсіяного випромінювання його пропускна

здатність знижується — від 0,77–0,79 (за інтенсивності випромінювання 1074–1080 Вт/м<sup>2</sup> у ясну погоду) до приблизно 0,74 у помірно похмурі дні (за інтенсивності близько 556 Вт/м<sup>2</sup>).

Таблиця 1

**Пропускна спроможність прозорого покриття та коефіцієнт ефективності повітряного сонячного колектора за результатами експериментів**

Тип прозорого покриття	№ експерименту	Загальна інтенсивність сонячного випромінювання до покриття, Вт/м <sup>2</sup>	Розсіяне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	Загальна інтенсивність сонячного випромінювання після покриття, Вт/м <sup>2</sup>	Пропускна спроможність	ККД колектора
Полістирол прозорий текстурований 2,5 мм, TOMO Design	1	1080	124	832	0,77	0,72
	2	690	256	545	0,79	0,74
	3	542	302	439	0,79	0,75
Скло віконне 3 мм	1	1074	129	848	0,79	0,74
	2	690	253	538	0,78	0,73
	3	568	321	443	0,78	0,73
Полікарбонат стільниковий прозорий, Onduclair РСМW	1	1080	122	842	0,78	0,73
	2	688	255	530	0,77	0,72
	3	556	318	411	0,74	0,69

Аналіз результатів роботи дозволив зробити наступні висновки. Використання сонячних повітряних колекторів у складі гібридних систем теплопостачання, що базуються на відновлюваних джерелах енергії, є технічно обґрунтованим і економічно вигідним рішенням. Це дає змогу підвищити енергоефективність системи в цілому, скоротити споживання традиційних енергоносіїв і сприяти сталому розвитку енергетичної галузі.

Для оцінки продуктивності гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії необхідно враховувати фактори навколишнього середовища, таких як швидкість вітру та сонячну радіацію.

У гібридній зерносушарці, що розроблена, відбувається поєднання двох джерел тепла: сонячної енергії та теплового насоса. Сонячний повітряний підігрівач забезпечує попередній нагрів повітря за рахунок безкоштовної відновлюваної енергії, тоді як тепловий насос підвищує температуру сушильного агента до необхідного рівня та одночасно утилізує тепло

відпрацьованого повітря. Завдяки цьому значно зменшуються енергетичні витрати на сушіння зерна, підвищується коефіцієнт корисної дії системи та забезпечується екологічно безпечніший процес сушіння.

### Список літератури:

1. Hassan Q. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications / Q.Hassan, S. Algburi, A.Z. Sameen, H.M. Salman, M. Jaszczur // *Results in Engineering*. – 2023. – Vol. 20. – P. 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
2. Дарибогов М.М. Гібридні енергетичні системи із джерелами ядерної та відновлювальної енергетики: огляд міжнародного досвіду та поточний стан / М.М. Дарибогов, О.М. Дибач // *Ядерна та радіаційна*. – 2022. – № 3(95). – С. 5–14. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).01).
3. Yahya M. Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy / M. Yahya, H. Fahmi, R. Hasibuan, A. Fudholi // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 45. – P. 102936. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936>.
4. Jonga J.B. Design and Construction of Hybrid Dryer for Grains / J.B. Jonga, N. Oji, O.A. Samuel // *FUOYE Journal of Engineering and Technology*. – 2024. – Vol. 9, no. 3. – P. 392-396. <https://doi.org/10.4314/fuoyejet.v9i3.4>.
5. Пазюк В.М. Сучасні підходи до вирішення проблеми підвищення енергоефективності сушіння насіннєвого зерна / В.М. Пазюк // *Vidnovluvana energetika*. – 2021. – № 4(67). – С. 90-99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).90-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).90-99).
6. Buyukzeren R., Kahraman A. A comparative study on the application of solar thermal collector and photovoltaic combinations to assist an air source heat pump / R. Buyukzeren, A. Kahraman // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2024. – Vol. 149. – P. 9413-9428. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13475-z>.

УДК 536.253

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ

К.т.н. Волчок В.О., Густяков С.О., Єлохов Д.В.  
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса  
resvicv@gmail.com  
Науковий керівник: к.т.н. Волчок В.О.

Сучасні напрями розвитку електроніки зосереджені на виробництві дедалі компактніших пристроїв, які водночас виділяють значно більше тепла в обмеженому просторі. Зменшення габаритів стало однією з головних вимог до сучасних електронних приладів (ЕП) і гаджетів, однак це створює нові виклики для інженерів, які шукають ефективні способи відведення тепла та забезпечення стабільної роботи техніки [1].

Оцінка теплового стану ЕП стикається зі значними труднощами через складну структуру самого приладу та особливості процесів, що відбуваються в його межах.

Дослідження теплового режиму ЕП вимагало визначення температурного поля складових залежно від часу та потужності. Завдання експериментального вивчення полягало у розгляді стаціонарного та нестаціонарного процесів тепловіддачі тіл у вигляді пластини з довкіллям.

Об'єктами досліджень було обрано напівпровідникові транзистори, які відрізнялися між собою потужністю, яку вони розсіюють, типом корпусу, габаритами, гранично допустимими температурами їхнього переходу та тепловим опором. Основні характеристики транзисторів з ізолюваним затвором представлено у табл. 1.

Таблиця 1

### Основні характеристики транзисторів із ізолюваним затвором [2]

Марка транзистору	Тип корпусу	Розсіювана потужність, Вт	Максимальна температура переходу, °C	Тепловий опір $R_T$ , °C/Вт	Виробник
HM70N20T	TO-247	180	150	0,340	H&M semi
TK39N60X	TO-247	250	150	0,463	Toshiba
FHA9N90D	TO-3P	280	150	0,450	Fairchild
AUIRFB4115	TO-220AB	380	175	0,610	Infineon

Для відносно малопотужних транзисторів можна зустріти інформацію, що максимальна температура поверхні корпусу приблизно дорівнює температурі

кристала. Для більш потужних транзисторів наявна технічна література не освітлює у повній мірі всі сторони цього питання [3].

Для визначення теплових режимів було обрано метод, який дозволяє визначати їх значення в нерівномірних зонах, спричинених виділенням зразком кількості тепла під час нагрівання. Для дослідження теплообміну одиночного транзистора при природній конвекції була створена експериментальна установка основними елементами якої є стабілізатор напруги, термопари та мілівольтметр.

У якості типу підключення транзистора була обрана схема із загальним емітером, яка найбільш широко застосовується, і при якій відбувається інверсія фази вхідної напруги. Такий тип підключення дає посилення по струму, причому посилення за напругою і за потужністю буде найбільшим з усіх можливих схем включення.

Для вимірювання температури поверхні транзистора  $T_c$ , що віддає теплоту, на зовнішній поверхні у різних місцях було розташовано 3 мідь-константанових термопари. Одна з термопар була розташована у зоні основного теплового потоку, а саме на поверхні мідної основи транзистора безпосередньо під кристалом, де і визначалась температура  $T_k$ .

Потужність, що споживається транзисторами, визначалася за показаннями амперметра та вольтметра. Сила струму визначалася ампер-вольтметром типу М 108/1 класу 0,2 з точністю  $5 \cdot 10^{-3}$  А. Напруга вимірювалася вольтметром М-502 класу 0,1 з точністю 0,15 В.

Транзистор підключався до схеми джерела стабільного струму із заданим значенням у 5 А. Падіння напруги контролювалось вольтметром безпосередньо на виходах транзистора, таким чином, змінюючи напругу, що подається на схему, можна задавати необхідне значення потужності.

Умови експлуатації ЕП часто не передбачають вихід на стаціонарний режим, що викликає необхідність дослідження нестационарних теплових режимів. При проведенні дослідів в умовах вільної конвекції на відкритій платі було встановлено, що незначні потоки повітря впливають на результати вимірювань.

Після того, як було досягнуто теплової рівноваги, здійснювали вимірювання температури. Згодом потужність збільшували до наступного етапу й повторювали процес до моменту, коли транзистор досягне лімітної потужності чи температури. Проміжок часу для кожного етапу становив 5 хвилин.

З метою надійного теплового контакту перед початком експерименту гарячі спаї термопар закріплювали на поверхні транзистора у спеціально підготовлених місцях. Після навантаження транзистора заданою потужністю проводили вимірювання температури з інтервалом 15 с.

Порядок обробки даних, отриманих в ході дослідження, включав первинний аналіз факторів, які спричинили відмову напівпровідникових приладів. Зокрема, розглядалися випадки порушення температурного балансу та перевищення максимально допустимої напруги, що є одним із ключових аспектів у методах прогнозування стабільності роботи ЕП. Встановлено, що

навіть тонкий шар полімерної плівки під основою значно знижує ефективність відведення тепла.

Проведено серію експериментів по визначенню зміни температури поверхні і темпу нагріву чотирьох марок транзисторів методом регулярного режиму першого роду. Отримано експериментальні і розрахункові дані розсіюваної потужності, температури поверхні, темпу нагріву, максимальної температури корпусу і температури кристалу транзисторів.

На рис. 1 представлено зміну різниці між температурами кристалу  $T_{p-n}$  та корпусу транзистору  $T_K$  в залежності від зростання потужності.

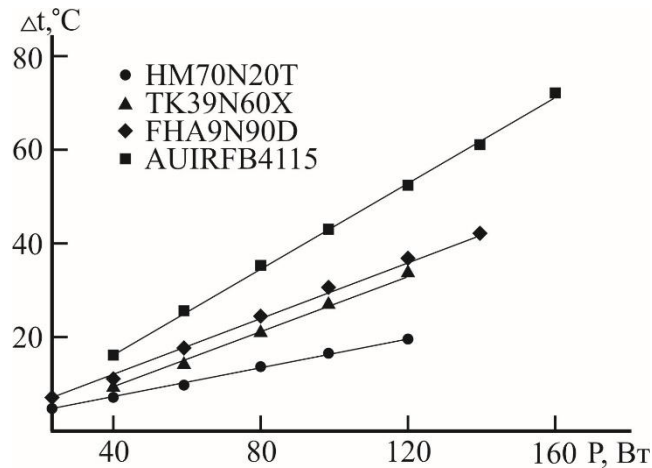


Рисунок 1 – Зміна різниці температур між кристалом і корпусом транзистора

Показано, що теплові процеси, які відбуваються у ЕП, відіграють важливу роль в формуванні їх функціональних характеристик. Саме ці процеси істотно впливають на надійність роботи всього ЕП, визначаючи його стабільність, довговічність і ефективність при експлуатації в різноманітних умовах.

Виконано аналіз похибок експериментальних даних. Згідно з визначеним класом точності вимірювальних приладів, було встановлено значення абсолютних похибок. Для вимірювання сили струму усереднена наведена похибка складала 0,002 А; для вимірювання напруги усереднена наведена похибка складала 0,001 В.

### Список літератури:

1. Qin Y. Thermal management and packaging of wide and ultra-wide bandgap power devices: a review and perspective / Y. Qin // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2023. – Vol. 56, No. 9. –093001. DOI: 10.1088/1361-6463/acb4ff.
2. Electronic Components Datasheet Search [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.alldatasheet.com/> (last access: 05.05.2026). – Title from the screen.
3. Bar-Cohen A. Near-junction thermal management for wide bandgap devices / A. Bar-Cohen, J.D. Albrecht, J.J. Maurer // Tech. Dig. - IEEE Compd. Semicond. Integr. Circuit Symp. CSIC. – 2011. – P. 10–14. DOI: 10.1109/CSICS.2011.6062454.

УДК 536.24:621.18

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕГРАДАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕЦ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

PhD, ас. Беднарська І.С., Радченко А.Ю.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Сучасний стан теплоенергетичного сектору характеризується високим ступенем зношення основного обладнання теплоелектроцентралей. Для енергоблоків ТЕЦ, що працюють в умовах змінних навантажень, високих температур та вібрацій, забезпечення надійності систем теплової ізоляції набуває особливого значення. Практика показує, що стан ізоляції часто не відповідає нормативним вимогам навіть після капітальних ремонтів, що зумовлено комплексним впливом експлуатаційних факторів [1].

Дослідження наявного енергетичного обладнання ТЕЦ потужністю 500 МВт вказує на те, що руйнування теплоізоляції має комплексний характер. Основними експлуатаційними факторами, що впливають на зміну її технічного стану, є температурні навантаження (високі температури викликають термічне старіння матеріалів, зниження їхньої механічної міцності та підвищення теплопровідності), вібраційні впливи (постійні вібрації від роботи обладнання призводять до поступового руйнування структури волокнистих матеріалів, їх просідання, зсуву шарів та порушення герметичності стиків), механічні пошкодження та волога (порушення цілісності захисного металевого кожуха є ключовим фактором, що ініціює деградацію). Деформація покриття відкриває доступ для вологи, що в свою чергу призводить до зволоження матеріалу, швидкого зростання його теплопровідності та розриву структури.

Аналіз результатів інструментального обстеження виявив, що руйнування ізоляції не є хаотичним, а має системно повторюваний характер. Деградація концентрується в типових зонах, які піддаються максимальному комплексному впливу. Найбільш уразливими осередками є:

- вузли зі складною геометричною формою, такі як фланцеві з'єднання, запірно-регулююча арматура та компенсатори;
- ділянки, де технологічно важко забезпечити суцільність ізоляційної кулі під час монтажу та післяремонтного відновлення;
- зони максимальних температур теплоносія, підвищених вібрацій та ділянки з відсутнім чи пошкодженим захисним покриттям.

Сформовані в таких вузлах неізольовані або частково ізольовані зони виступають не просто як локальні відхилення, а як визначальні осередки прискореного руйнування всієї системи [2].

Спираючись на методи системного аналізу, процеси деградації теплової ізоляції слід розглядати як результат одночасної дії термічних, механічних та

конструктивних факторів. Тому запропоновано узагальнену модель руйнування, яка демонструє самоприскорювальний характер цього явища. Цей процес включає наступні стадії:

- 1) поява початкових дефектів внаслідок недоліків монтажу або пошкодження захисного кожуха;
- 2) прямиий вплив зовнішніх факторів: температури, вібрацій та проникнення вологи;
- 3) трансформація внутрішньої структури матеріалу, що проявляється в його просіданні, ущільненні та втраті пружних властивостей;
- 4) утворення так званих «теплових містків» і локальних зон з підвищеною теплопередачею [3];
- 5) розширення дефектної зони: локальне зростання теплових втрат підвищує температурне навантаження на прилеглий матеріал, що інтенсифікує його термічну деградацію та прискорює загальне руйнування конструкції.

**Висновки.** Деградація теплової ізоляції енергетичного обладнання ТЕЦ – це складний, локалізований та системний процес, що запускається переважно пошкодженнями захисних покриттів або складною геометрією вузлів та інтенсифікується під дією температур та вібрацій. Розуміння «самоприскорювальної» природи цих руйнувань та закономірностей їх просторового розподілу дозволяє достовірно прогнозувати зони підвищеного ризику, що є базою для розробки нових підходів до проектування, монтажу та обслуговування ізоляційних систем для підвищення їхньої надійності.

#### Список літератури:

1. Leem Y. Long-term stability and water vapor induced degradation of physico-chemical properties of XPS and PF / Y. Leem, R. Kitagaki, T. Ishida, H. Nagihara // *Developments in the Built Environment*. – 2024. – Vol. 18. – 100429. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100429>.
2. Wagner C. A methodology for the assessment of multiple benefits of industrial energy efficiency measures / C. Wagner, M. Obermeyer, R. Lüchinger // *SN Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2(2). – 270. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2071-2>.
3. Naik S. The benefits of energy efficiency in small and medium enterprises / S. Naik, S.B. Mallur // *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2018, June). – Vol. 376 (1). – 012116. DOI 10.1088/1757-899X/376/1/012116.
4. Лементар С.Ю. Моделювання газодинаміки вологої пари в головних паропроводах атомної електростанції / С.Ю. Лементар, І.С. Беднарська, Д.В. Риндюк // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. – 2021. – № 5 (32). – С. 159-167. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/25>.

**Секція 3**  
**Нетрадиційна та відновлювана**  
**енергетика**

УДК 621.311.243:621.316

## ФОРМАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ГІБРИДНОЇ МІКРОМЕРЕЖІ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ ЗА УМОВ ПРІОРИТЕТНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Доктор філософії Матушкін Д.С.

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

dmitry.matushkin@ukr.net

У сучасних умовах розвитку розосередженої генерації, зростання частки відновлюваних джерел енергії та підвищення вимог до надійності електропостачання особливої актуальності набувають гібридні мікромережі, у яких локальні джерела енергії, накопичувачі та навантаження розглядаються як єдина керована система [1-3]. Такі мікромережі дають змогу підвищувати енергетичну автономність об'єктів і забезпечувати стійке живлення споживачів у разі дефіциту генерації, зміни навантаження або порушення зв'язку із зовнішньою мережею. Особливо важливо це для об'єктів, де частина споживачів має підвищені вимоги до безперервності живлення, тоді як інша може бути тимчасово обмежена без критичних наслідків.

Метою роботи є формалізація моделі гібридної мікромережі з фотоелектричною генерацією та накопичувачем енергії за умов пріоритетного електропостачання критичних навантажень. Для цього передбачено побудову узагальненої структури мікромережі, формалізацію її енергетичних потоків, визначення базових режимів функціонування та обґрунтування логіки керування, що забезпечує першочергове живлення критичних споживачів і кероване обмеження некритичного навантаження.

Досліджувана гібридна мікромережа розглядається як локалізована енергетична система, до складу якої входять фотоелектрична підсистема генерації, накопичувач електроенергії, зовнішня електрична мережа, внутрішня шина потужності та підсистема навантаження (рис. 1).



Рисунок 1 – Узагальнена структура досліджуваної гібридної мікромережі

Фотоелектрична генерація є основним локальним джерелом електроенергії, потужність якого змінюється відповідно до умов сонячного випромінювання. Накопичувач енергії виконує буферну функцію, оскільки дає змогу акумулювати надлишок виробленої енергії, покривати дефіцит потужності, підтримувати електроживлення в автономному режимі та зменшувати залежність від зовнішнього джерела. Зовнішня мережа в такій постановці не розглядається як необмежене джерело енергії, а трактується як окрема функціональна підсистема, що забезпечує імпорт електроенергії в мережевому режимі та може бути недоступною в автономному. Навантаження мікромережі поділяється на дві узагальнені категорії: критичне та некритичне, що формує основу для реалізації пріоритетного електропостачання.

Функціонування мікромережі описується через баланс потужності між генерацією, накопичувачем, зовнішньою мережею та споживанням, поданий у вигляді виразу (1) [4, 5]:

$$P_{\text{ген}}^{\text{фотоел}}(t) + P_{\text{накоп}}^{\text{розр}}(t) + P_{\text{імп}}(t) = P_{\text{постач}}^{\text{навант кр}}(t) + P_{\text{постач}}^{\text{навант некр}}(t) + P_{\text{накоп}}^{\text{зар}}(t) + P_{\text{експ}}(t) + P_{\text{втрат}}(t) \quad (1)$$

де  $P_{\text{ген}}^{\text{фотоел}}(t)$  – потужність фотоелектричної генерації;  $P_{\text{накоп}}^{\text{розр}}(t)$  і  $P_{\text{накоп}}^{\text{зар}}(t)$  – потужності розрядження і зарядження накопичувача, відповідно;  $P_{\text{імп}}(t)$  і  $P_{\text{експ}}(t)$  – потужності імпорту та експорту електроенергії, відповідно;  $P_{\text{постач}}^{\text{навант кр}}(t)$  і  $P_{\text{постач}}^{\text{навант некр}}(t)$  – фактично забезпечені потужності критичного та некритичного навантаження, відповідно;  $P_{\text{втрат}}(t)$  – сумарні втрати потужності в елементах мікромережі.

У кожний дискретний момент часу має виконуватися умова енергетичної узгодженості, за якої потужність локальної генерації разом із можливою потужністю розряду накопичувача та імпортом із зовнішньої мережі забезпечує покриття критичного й некритичного навантаження, а також зарядження накопичувача за наявності надлишку енергії. Такий підхід дозволяє описати мікромережу як керовану систему розподілу енергетичних потоків, де режим кожної підсистеми визначається в контексті загального балансу.

Ключовою змінною стану накопичувача є рівень заряду, який визначає запас доступної енергії для подальшого використання. У моделі враховуються мінімально та максимально допустимі межі заряду, а також обмеження на потужність зарядження і розрядження. Це важливо, оскільки накопичувач не може одночасно виконувати роль необмеженого джерела і приймача енергії. Крім того, саме його стан значною мірою визначає здатність мікромережі зберігати стійкість у періоди зниження фотоелектричної генерації або втрати зовнішнього електропостачання.

Принципово важливим елементом моделі є алгоритм керування енергопотокami, логіка якого ґрунтується на пріоритетному забезпеченні критичного навантаження. На кожному часовому кроці оцінюються доступна потужність фотоелектричної генерації, поточні рівні критичного і некритичного попиту, стан заряду накопичувача та доступність зовнішньої мережі. Якщо локальної генерації достатньо для покриття всього навантаження, система працює в режимі використання надлишкової енергії для зарядження

накопичувача. Якщо ж потужність генерації недостатня, дефіцит спочатку компенсується за рахунок накопичувача. За наявності зв'язку із зовнішньою мережею може додатково залучатися імпорту електроенергії. Лише в разі, коли сумарного доступного ресурсу все одно недостатньо, активується механізм керованого обмеження некритичного навантаження. Така послідовність рішень дозволяє максимально довго зберігати живлення критичних споживачів.

Поділ навантаження на критичне та некритичне має функціональний зміст. Критичні споживачі повинні забезпечуватися електроенергією з максимальним пріоритетом, оскільки втрата їх живлення може призвести до порушення основних функцій об'єкта, погіршення безпеки або втрати керованості. Некритичне навантаження, навпаки, допускає часткове чи повне обмеження. Саме тому в умовах енергетичного дефіциту або погіршення режиму система керування повинна реалізовувати вибіркове та кероване зниження попиту, перетворюючи навантаження з пасивного елемента балансу на активний інструмент енергоменеджменту.

Для підвищення селективності керованого обмеження некритичні навантаження можуть додатково ранжуватися за рівнем пріоритетності. У такому випадку першочергового обмеження зазнають ті споживачі, для яких тимчасове відключення або зниження потужності є найменш чутливим з точки зору функціонування об'єкта. Така логіка особливо важлива у випадках тривалого дефіциту енергії, коли недостатньо просто відокремити критичне навантаження від некритичного, а потрібно правильно визначити черговість відключення окремих груп.

У межах роботи доцільно розглядати щонайменше три базові режими функціонування мікромережі. Перший режим відповідає роботі з опорою на зовнішню мережу, коли локальна фотоелектрична генерація та накопичувач зменшують потребу в імпорті електроенергії, але система зберігає можливість балансування за рахунок зовнішнього джерела. Другий режим є автономним і відповідає ситуації втрати зв'язку з мережею. У цьому випадку електроживлення має підтримуватися лише за рахунок локальної генерації та запасу енергії в накопичувачі, а пріоритетність навантаження набуває особливої ваги. Третій режим пов'язаний із переходами між мережевим та автономним станами. Саме в цих режимах найбільш виразно проявляється якість обраної логіки керування, оскільки система повинна швидко перебудовувати розподіл енергопотоків без втрати функціональної стійкості [2, 3].

Оцінювання ефективності запропонованого підходу доцільно проводити за сукупністю показників, які відображають не лише енергетичний баланс, а й якість забезпечення навантаження. До таких показників належать рівень забезпечення критичного навантаження, частка покриття некритичного навантаження, обсяг незабезпеченого попиту, ступінь використання накопичувача, рівень залежності від зовнішньої мережі та характер змін енергетичних потоків у різних сценаріях. Особливо важливим є показник збереження живлення критичних споживачів, оскільки саме він прямо характеризує придатність мікромережі до роботи в умовах пріоритетного електропостачання.

Практичне значення запропонованої моделі полягає в можливості дослідження різних сценаріїв функціонування мікромережі без прив'язки до одного конкретного об'єкта. Така модель може використовуватися для аналізу впливу змін фотоелектричної генерації, початкового стану заряду накопичувача, тривалості автономного режиму, ступеня дефіциту потужності та частки критичного навантаження на поведінку системи. Це створює основу для обґрунтування принципів побудови локальних систем електропостачання, уточнення структури пріоритетів споживачів і вдосконалення алгоритмів керування енергопотоками.

### Список літератури:

1. Habibnia S. Data-driven solutions for microgrids energy management systems: A state-of-the-art survey on current trends and future directions / S. Habibnia, M. Faraji, M.H. Alizadeh, Z.M. Mollayousefi, R. Caire, G.B. Gharehpetian, J.M. Guerrero // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2026. – Vol. 228. – Art. 116592. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116592.
2. Samal K.B. A review on microgrid control: Conventional, advanced and intelligent control approaches / K.B. Samal, M. Mahapatra, S. Pati, M.K. Debnath // *Unconventional Resources*. – 2026. – Vol. 9. – Art. 100297. DOI: 10.1016/j.unres.2025.100297.
3. Kostenko G. Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation / G. Kostenko, A. Zaporozhets // *System Research in Energy*. – 2023. – No. 3(74). – P. 25-38. DOI: 10.15407/srenergy2023.03.025.
4. Гавриленко Я. Енергетичні комплекси на основі сонячних електростанцій та акумуляторних систем зберігання енергії / Я. Гавриленко, В. Дерій // *Системні дослідження в енергетиці*. – 2025. – № 3(83). – С. 17-30. DOI: 10.15407/srenergy2025.03.017.
5. Ворушило А.О. Про дослідження однієї Microgrid / А.О. Ворушило // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2025. – № 4. – С. 44-52. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2025.341319.

УДК 621.313

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ТРЕКЕРІВ В УРБАНІЗОВАНИХ УМОВАХ

К.т.н., доц. Петрик О.А., Жуков Р.О., к.т.н., доц. Назаренко І.А.  
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя  
iternell17@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Петрик О.А

В умовах зростання цін на енергоносії та потреби в енергетичній незалежності, розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, набуває особливої актуальності. Сонячні електростанції (СЕС) на дахах багатопверхових будівель є перспективним рішенням для міського середовища, де площа для наземних установок обмежена [1]. Для максимізації виробітку електроенергії з обмеженої площі критично важливим є використання технологій, що підвищують ефективність системи. Сонячні трекери, які автоматично орієнтують фотомодулі перпендикулярно до сонячних променів, є одним із найефективніших інструментів для досягнення цієї мети [2]. Сучасні наукові праці зосереджуються на оптимізації конструкцій трекерів, їх адаптації до обмеженого простору в урбанізованих умовах та врахуванні кліматичних факторів, таких як температура та інсоляція [3].

Основною метою цього дослідження є аналіз технічної та економічної доцільності впровадження різних типів сонячних трекерів для СЕС, що розміщується на даху типового дев'ятиповерхового будинку. Завданнями роботи є проведення порівняльного аналізу одновісних та двохосних трекерів, виконання технічних розрахунків генерації, оцінка просторових обмежень і температурних втрат, а також економічне обґрунтування для двох конкретних локацій в Україні: Запоріжжя (південь) та Івано-Франківськ (захід).

Для розрахунків та аналізу було задано такі географічні умови: варіант 1 – м. Запоріжжя (широта 47.85 пн. ш.); варіант 2 – м. Івано-Франківськ (широта 48.92 пн. ш.). Технічні параметри проєкту передбачають розміщення СЕС на даху будівлі висотою 31 м, з доступними розмірами ділянки 60 м у довжину та 20 м у ширину. У моделюванні використано фотомодулі розміром 2.1 м × 1.13 м з номінальною потужністю 560 Вт. Додаткові обмеження включають сервісні коридори шириною 1 м та пожежні відступи 1.5 м [4].

Кліматичні особливості обраних регіонів суттєво відрізняються, що безпосередньо впливає на вибір типу системи. У Запоріжжі середньорічна інсоляція становить близько 1800 год/рік, літня температура досягає 35 °С, а зима опускається до -18 °С. В Івано-Франківську клімат більш вологий, літня температура становить 27 °С, а зима знижується до -23 °С. Ключові кліматичні параметри наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Географічні та кліматичні параметри локацій**

Параметр	м. Запоріжжя	м. Івано-Франківськ
Географічна широта	47.85 пн. ш.	48.92 пн. ш.
Клімат	Континентальний	Передгір'я, вологий
Середньорічна інсоляція	800 год/рік	1500-1600 год/рік
Літня температура (задана)	35 °С	27 °С
Зимова температура (задана)	-18 °С	-23 °С
Вплив температури на генерацію	Значні втрати влітку	Мінімальні втрати влітку, приріст взимку

Виділена ділянка площею 1200 м<sup>2</sup> не може бути використана повністю через необхідність дотримання пожежних відступів по периметру [4] та сервісних коридорів між рядами. Це значно зменшує ефективну площу для встановлення панелей. Порівняння кількості модулів та сумарної потужності для статичної та трекерної систем наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Порівняння кількості модулів та потужності**

Тип системи	Відстань між рядами (м)	Кількість рядів	Кількість модулів	Встановлена потужність (кВт)
Статична	3.5	16	240	134.4
Трекерна	4.5	12	180	100.8

Як свідчать результати досліджень, статична система дозволяє розмістити більшу кількість панелей (240 шт. загальною потужністю 134.4 кВт), тоді як необхідність розширення відстані між рядами для уникнення затінення у трекерних системах обмежує їх місткість до 180 панелей (100.8 кВт). Проте, попри меншу встановлену потужність, розрахунок річного виробітку демонструє переваги рухомих конструкцій. У Запоріжжі двовісна система здатна генерувати 203,212 кВт·год на рік, що перевищує показники статичної системи (193,536 кВт·год). В Івано-Франківську двовісна система генерує 180,953 кВт·год проти 172,032 кВт·год у статичної.

Водночас найбільшим ризиком для обох локацій є розміщення трекерів на висоті 31 м. Більшість комерційних трекерів призначені для наземного монтажу. Зі збільшенням висоти вітрове навантаження зростає за експоненціальною залежністю, що є критичним фактором для конструкцій з рухомими частинами і створює загрозу надійності та безпеці. Встановлення на такій висоті вимагає обов'язкового спеціалізованого структурного аналізу з урахуванням місцевих будівельних норм (ДБН) [4], що може призвести до необхідності значного посилення конструкції даху та збільшення загальної

вартості проєкту.

На основі проведених досліджень встановлено, що для Запоріжжя впровадження одновісних трекерів є найбільш обґрунтованим рішенням, оскільки вони компенсують температурні втрати влітку [3] та забезпечують значний приріст генерації при помірних інвестиціях. Для Івано-Франківська вища географічна широта та нижчі температури роблять особливо ефективним використання двовісних або одновісних трекерів з похилою віссю для максимізації виробітку взимку [1].

#### **Список літератури:**

1. Solanki C.S. Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications / C.S. Solanki. – PHI Learning Pvt. Ltd, 2015. – 185 p.
2. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – Wiley, 2013. – 175 p.
3. Skoplaki E. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations / E. Skoplaki, J. A. Palyvos // Solar Energy. – 2009. – 83(9). – P. 1618-1628.
4. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту [Чинний від 2015-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2019. 97 с.

УДК 621.548

## ВИРАЗ ДЛЯ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ РІЧНОГО ОБСЯГУ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІТРОУСТАНОВКАМИ

К.т.н., доц. Курак В.В., Грисевич Р.І.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
vk\_74@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Курак В.В.

В Енергетичній стратегії України на період до 2050 року, схваленій Кабінетом Міністрів 21 квітня 2023 р. [1], значну увагу приділено розвитку об'єктів розподіленої генерації, що потенційно забезпечить меншу вразливість електроенергетичної системи держави щодо ворожих атак. Особливу роль в цій концепції відведено об'єктам, що використовують відновлювані джерела енергії, як-то сонячним та вітровим електростанціям.

Територія України має значний потенціал щодо збільшення обсягів виробленої електричної енергії за рахунок введення в експлуатацію нових потужностей вітроелектричних станцій [2]. Причому, збільшення сумарної встановленої потужності може відбуватися не лише за рахунок спорудження потужних вітропарків, а й шляхом розвитку мережі індивідуальних вітроелектричних установок (ВЕУ), як тих, що взаємодіють як із загальною електроенергетичною системою, так і автономних вітроенергетичних систем.

Питання економічної доцільності будівництва ВЕУ в тій чи іншій місцевості потребує попередньої оцінки очікуваного річного обсягу виробленої електричної енергії. Строгий підхід до вирішення цього питання базується на статистичному аналізі наявних метеорологічних даних щодо вітрового режиму місцевості [3]. Втім, у випадку відсутності таких даних для конкретної місцевості, де планується встановлення ВЕУ, реалізація зазначеного підходу потребує організації довгострокових досліджень параметрів вітрових потоків. Такі спеціалізовані метеорологічні дослідження цілком прийнятні для оцінки очікуваних енергетичних показників потужних вітропарків, спорудження яких планується на даній території. Втім, для прийняття рішення щодо доцільності побудови індивідуальної ВЕУ малої потужності організація цих досліджень є недоречною.

В даній роботі запропоновано аналітичний вираз для спрощеної оцінки річного обсягу виробленої енергії ВЕУ, що потребує мінімальної інформації про вітровий режим місцевості і обмежується знанням середньобагаторічної швидкості вітру.

Згідно [4] потужність вітрового потоку  $N$  пов'язана зі швидкістю вітру  $v$  наступною кубічною залежністю:

$$N = 0,5\rho v^3 F, \quad (1)$$

де  $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$  - густина повітря при нормальних атмосферних умовах;  $F$  – площа обмаху вітродвигуна ВЕУ, через яку проходить вітровий потік.

Втім, не вся потужність вітрового потоку здатна бути перетворена ВЕУ у корисну енергію, що враховується уведенням коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнта потужності)  $C_p$ , який показує долю енергії вітрового потоку, що може бути відібраною даною установкою. Для вітроустановок, що працюють на силі лобового тиску,  $C_p$  не перевищує 0,1. Сучасні ж ВЕУ в переважній своїй більшості приводяться в дію аеродинамічною підйомною силою, що виникає на лопатевому апараті вітроколеса при набіганні повітряного потоку. Для таких ВЕУ коефіцієнт використання енергії вітру значно вищий і становить від 0,3 до 0,5 в залежності від особливостей конструкції вітродвигуна та його розташування в повітряному потоці [4]. У зв'язку з цим, корисна потужність, яка може бути відібрана від повітряного потоку, що набігає на вітроколесо ВЕУ зі швидкістю  $v$ , становитиме:

$$N_{\text{ВЕУ}} = 0,5C_p\rho v^3F. \quad (2)$$

Оскільки вітер є випадковим енергетичним ресурсом, що здатен раптово змінювати свою швидкість, значно перевищуючи величину  $v_{\text{ср}}$ , то при оцінці необхідної встановленої потужності ВЕУ  $N_{\text{ВЕУ в}}$  орієнтуються не на середньорічну, а на так звану розрахункову (номінальну) швидкість вітру  $v_{\text{н}}$ , яка пов'язана з середньорічною наступним виразом [4]:

$$v_{\text{н}} = (1,25 \div 2)v_{\text{ср}}. \quad (3)$$

Приймаючи множник перед  $v_{\text{ср}}$  в формулі (3) як середнє значення вказаного діапазону, отримуємо наступний вираз для розрахункової встановленої потужності ВЕУ:

$$N_{\text{ВЕУ в}} = 0,5C_p\rho(1,6v_{\text{ср}})^3F = 2,05C_p\rho v_{\text{ср}}^3F. \quad (4)$$

На відміну від строгого розрахунку, що базується на статистичному аналізі характеристик вітрового режиму на місцевості, для оцінки річного обсягу виробленої енергії варто застосувати спрощений підхід, що полягає в уведенні коефіцієнта використання встановленої потужності  $C_{\text{в}}$ , який показує відсоток годин у році, протягом яких ВЕУ працює зі встановленою потужністю, і для ВЕУ, розташованих на суходолі, становить близько 0,3 [4].

З врахуванням коефіцієнта використання встановленої потужності  $C_{\text{в}}$  вираз для оцінки річного обсягу виробленої електричної енергії  $E_{\text{рік}}$  (Вт·год) може бути записаний у вигляді:

$$E_{\text{рік}} = C_{\text{в}}N_{\text{ВЕУ в}}8760 = 2,05C_{\text{в}}C_p\rho v_{\text{ср}}^3F \cdot 8760 = 17958C_{\text{в}}C_p\rho v_{\text{ср}}^3F, \quad (5)$$

де 8760 – кількість годин у році.

Підставляючи у вираз (5) типові значення  $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_p = 0,4$  та  $C_{\text{в}} = 0,3$  та переводячи обсяг виробленої енергії з Вт·год в кВт·год, остаточно отримуємо:

$$E_{\text{рік}} = 2,69v_{\text{ср}}^3F, \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2. \quad (6)$$

Проведено порівняння результатів оціночного розрахунку за формулою (6)

з даними щодо річного обсягу виробленої ВЕУ енергії, наведеними в роботі [5] для метеостанції «Берислав» ( $v_{cp} = 4,3$  м/с), де застосовано більш строгий підхід, що враховує річну повторюваність швидкостей вітру за їх градаціями. Результати цього порівняння наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняння результатів розрахунків з літературними даними**

ВЕУ	Річне вироблення енергії, кВт·год		Відносне відхилення, %
	Розрахунок	Літературні дані [5]	
STORM USE	5265	7194	26,8
LOW WIND	6877	8998	23,6
CB-1,2/30	242	300	19,3

Як показує аналіз даних табл. 1, оціночний розрахунок за запропонованим аналітичним виразом дає занижені на 19-27 % обсяги річного вироблення електричної енергії вітроустановками. Це може бути пов'язано з доволі грубим припущенням про фіксованість коефіцієнтів використання енергії вітру  $C_p = 0,4$  та коефіцієнту використання встановленої потужності  $C_v = 0,3$ , що були прийняті під час отримання виразу (6). Більше того, величина коефіцієнту  $C_v$  приймалася на найнижчому рівні з можливого діапазону його значень, характерних для оншорних ВЕУ в метеорологічних умовах України.

Втім, запропонований вираз цілком може бути використаний для попередньої експрес-оцінки річного обсягу вироблення енергії вітроустановками в умовах місцевості з відомою середньобагаторічною швидкістю вітру.

**Список літератури:**

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. №373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року» [Електронний ресурс] / Верховна рада України [Сайт]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (дата звернення 3.04.26). – Назва з екрану.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. За заг. ред. С.О. Кудрі. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
3. Вітроенергетика / За заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2023. – 135 с.
4. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. – 492 с.
5. Андропова О.В. Порівняння техніко-економічних показників децентралізованої вітроелектричної та фотоелектричної станцій / О.В. Андропова, В.В. Курак // Вісник ХНТУ. – 2017. – №4(63). – С. 19-26.

УДК 662.997

## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА НА ЙОГО ЕФЕКТИВНІСТЬ

К.т.н., доц. Тарасенко О.М., Чупріна Л.О.

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

alextar552@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Тарасенко О.М.

Використання сонячних геліоколекторів значною мірою може знижувати споживання теплової енергії, що отримується за рахунок електричної енергії або спалювання органічного палива. Їх застосування в системах тепlopостачання має позитивні наслідки економічного, експлуатаційного та екологічного характеру.

Аналіз джерел інформації [1, 2] показує практичну доцільність застосування геліосистем. При цьому [2] акцент зроблено на створення енергетичних комплексів, що включають як традиційне котельне обладнання, так і геліоколектори. Водночас, впровадження таких установок йде повільними темпами, що пояснюється досить високими вартісними показниками. Незважаючи на відносну простоту сонячних установок, вони мають значну матеріалоемність, обумовлену великою сумарною площею сонячних колекторів. Терміни окупності сонячних колекторів тривалі і можуть виходити за рамки термінів їхньої штатної (і тим більше, гарантійної) експлуатації.

Як відомо, основним елементом сонячної установки є геліоколектор, який являє собою плоску променевосприймаючу панель з каналами для циркуляції теплоносія, виготовлену з металу та розміщену в корпусі. На рис. 1 схематично зображено колектор даної конструкції.

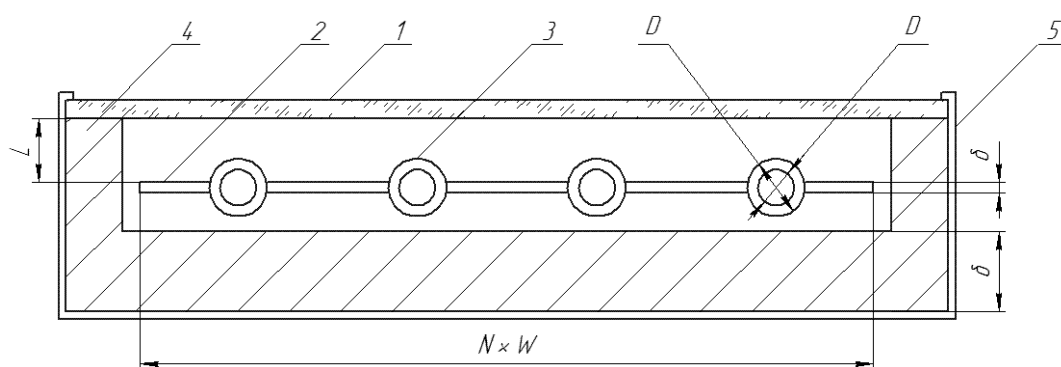


Рисунок 1 – Схема колектора:

1 – прозоре покриття; 2 – променесприймаючі пластини; 3 – труби; 4 – теплоізоляція; 5 – корпус; N – кількість труб; W – відстань між трубами; L – відстань між пластиною та склом;  $\delta$  – товщина пластини;  $\delta_{iz}$  – товщина теплоізоляції;  $D_1$  – внутрішній діаметр труби; D – зовнішній діаметр труб

В даній роботі розглядається плоский колектор з плавниковими променесприймаючими трубами. Це означає, що пластини приєднано до труб в їх центральній частині. З'єднання здійснено за допомогою газо- або електрозварки, що повинно забезпечити необхідну, досить невелику величину теплового опору між пластинами та трубами.

В якості матеріала для виготовлення труб та пластин, використовується сталь. Дослідження колектора виготовленого з чорного металу, спрямовано на оцінку принципової можливості його виготовлення з точки зору того, що традиційним матеріалом для колекторів є алюміній.

На рис. 2 показано залежність ККД колектора від відстані між трубами, при різному значенні товщини пластини.

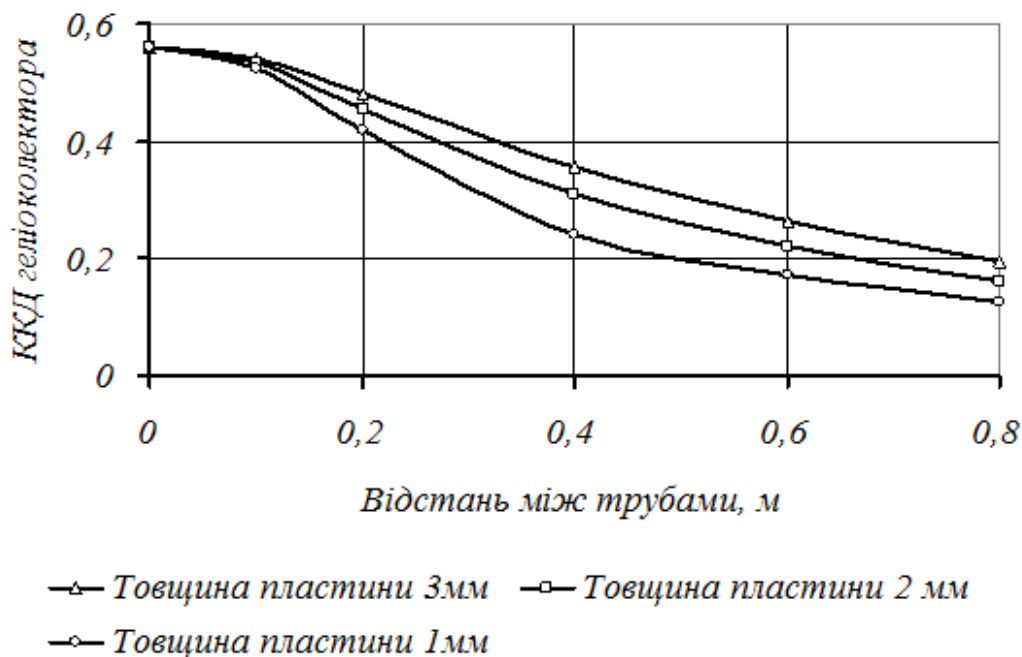


Рисунок 2 – Графік залежності повного ККД колектора від величини відстані між трубами

З побудованих графіків видно, що ефективність колектора знижується з ростом відстані між трубами. Це викликано тим, що пластина має певний тепловий опір, який негативно впливає на ефективність колектора. Даний опір росте при збільшенні відстані між трубами.

Крутість ліній даного графіка, залежить від товщини пластини, бо разом з величиною відстані між трубами, вона визначає теплопровідність пластини і параметр ефективності ребра  $F$ .

Із теплотехнічних міркувань, необхідно намагатися зменшувати відстань між трубами. Це веде до подорожчання колектора, так як для набору необхідної площі колектора, потрібно мати більшу долю труб, та виконувати більше зварних з'єднань. Тому при проектуванні конкретної моделі колектора, необхідно враховувати вартість отриманої енергії.

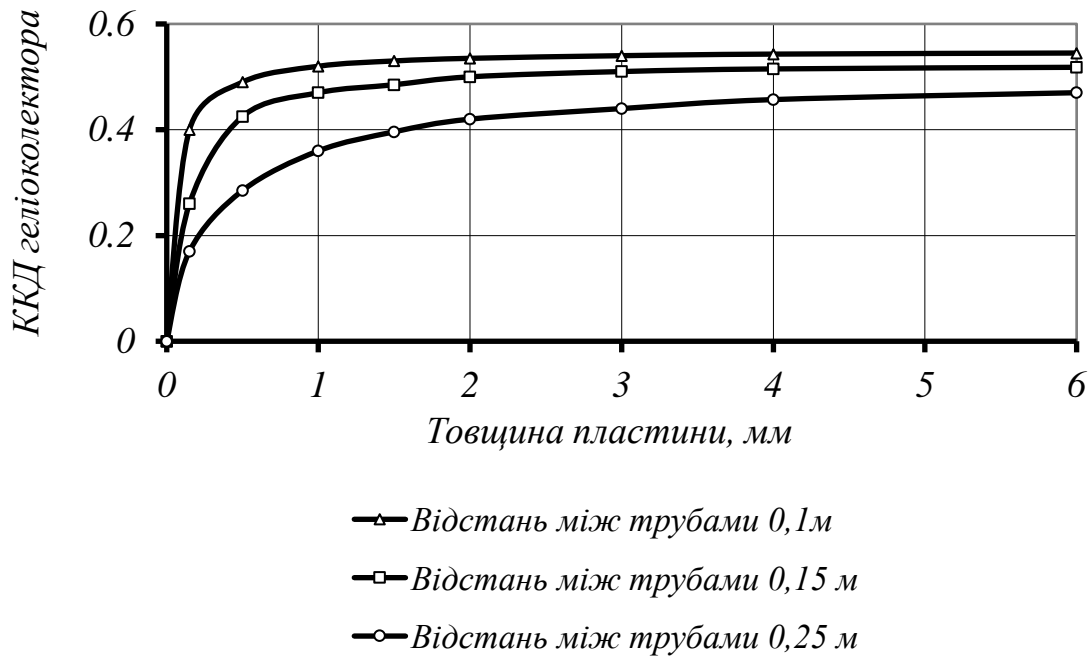


Рисунок 3 – Залежність ККД від товщини пластини

З даного графіка видно, що ККД зростає зі збільшенням товщини пластини. Подібним чином, на ККД буде діяти зміна теплопровідності матеріалу пластини. Так само, крутість нахилу даних кривих, залежить від величини параметру  $W$ : чим менша відстань між трубами, тим слабше вплив товщини пластини на ефективність колектора.

Обираючи товщину металу для конкретної конструкції колектора, необхідно, так само, враховувати економічну сторону питання. Наприклад, для випадку, коли відстань між трубами рівна 10 см, то збільшення товщини пластини з 1 до 2 мм, ККД практично не зростає, але витрати на матеріал пластини, зростають вдвічі. При цьому, також, зростає маса колектора, а сьогодні факторам легкості конструкції та зручності монтажу, приділяється особлива увага.

#### Список літератури:

1. Денисова А.Є. Сонячні системи теплопостачання / А.Є. Денисова, М.Д. Андрійчук. – Одеса: ОДПУ, 2001.–81 с.
2. Озарків І.М. Використання сонячної енергії у промисловості / І.М. Озарків, Й.С. Мисак, З.П. Копинець. – Львів: НВФ «Українські технології», 2008. – 276 с.
3. Гальчак В. Альтернативні джерела енергії: навч. посіб./ В. Гальчак, В. Боярчук. – Львів: Арал, 2008. – 135 с.

УДК 621.311

## РОЗРОБКА МЕРЕЖЕВОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДАХОВОГО ТИПУ ДЛЯ ОФІСНОЇ БУДІВЛІ ПРАТ «ДТЕК КИЇВСЬКІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ»

К.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л., Сухорука В.О., Корнієнко О.О.  
*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
don.natalia@kntu.edu.ua

Науковий керівник: к.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л.

В Україні станом на початок 2026 року зафіксовано значний розвиток ринку сонячної енергетики. Проблеми, викликані бойовими діями, що продовжуються, спонукали українців розвивати децентралізоване виробництво енергії. Запровадження страхування військових ризиків для інвесторів та покращення інтеграції з європейськими енергетичними ринками можуть ще більше прискорити цей процес, що є значним кроком на шляху до енергетичної незалежності [1].

В даній роботі розроблено мережеву фотоелектричну станцію дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» (м. Київ, Україна). За даними ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі», офісною будівлею протягом 2024 року сплачено за спожиту електроенергію понад 950 тис.грн [2]. Отже, розробка мережевої фотоелектричної станції дахового типу для зазначеного об'єкту є актуальною та перспективною.

Офісна будівля ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» має два корпуси:

- головний корпус має покрівлю з фіксованим нахилом, що не затінюється сусідніми об'єктами і може бути використана для розміщення фотоелектричних модулів з фіксацією на елементах покрівлі з кутом нахилу поверхні покрівлі;
- допоміжний корпус з плоским дахом, що дозволяє розташувати фотоелектричні модулі будь-яким способом.

До встановлення на фотоелектричній станції прийнято фотоелектричні модулі Trina Solar, TSM-PD14 320 Вт, для перетворення постійного струму в змінний струм прийнято до встановлення на фотоелектричній станції стрингові трифазні мережеві інвертори Sunny Tripower 24000TL-US (SMA).

В програмному середовищі HelioScore [3] розроблено дизайн для трьох варіантів конфігурації мережевої фотоелектричної станції дахового типу (рис.1):

*варіант 1* – розміщення фотоелектричних модулів на даху допоміжного корпусу типу «схід-захід»;

*варіант 2* – розміщення фотоелектричних модулів на даху допоміжного корпусу суцільним масивом типу «навіс»;

*варіант 3* – розміщення фотоелектричних модулів на даху допоміжного корпусу рядами з фіксованим кутом нахилу.

В усіх трьох варіантах також передбачено встановлення фотоелектричних модулів на даху основного корпусу суцільним масивом за кутом нахилу

покрівлі.

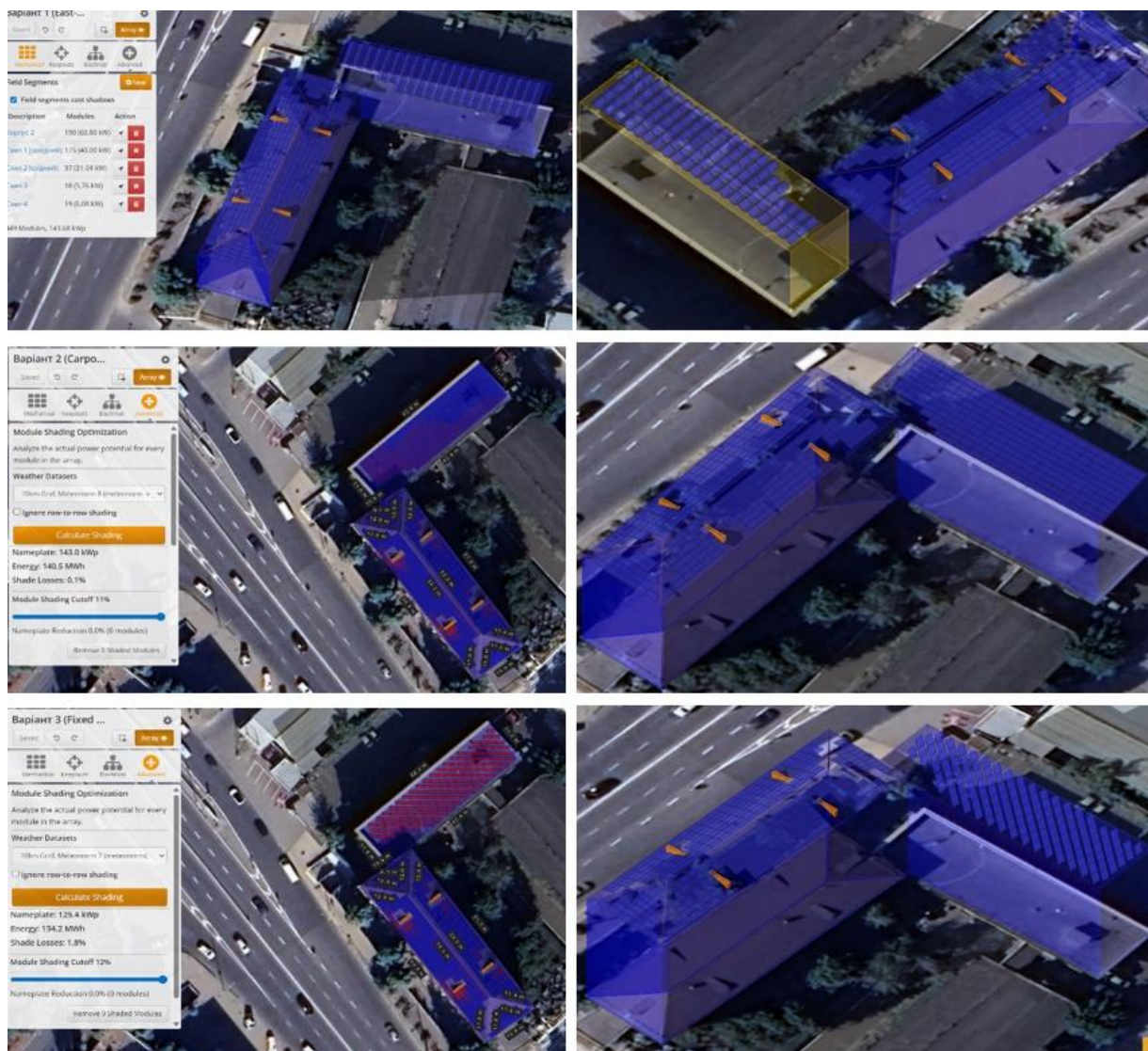


Рисунок 1 – Варіанти мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі», візуалізовано в HelioScore [3]

Моделюванням в HelioScore [3] роботи мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» визначено структуру втрат в системі фотоелектричної станції, зокрема втрати в інверторах, втрати в мережі постійного струму, втрати в мережі змінного струму, втрати через затінення чи забруднення фотоелектричних модулів, зменшення потужності фотоелектричного модуля через його перегрівання тощо. На рис. 2 наведено звіт з моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі».

За результатами моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» для кожного із варіантів визначено загальні технічні показники (табл. 1) мережевої фотоелектричної станції та усереднене значення генерації електричної енергії

фотоелектричною станцією в мережу впродовж року з урахуванням втрат в складових системи (рис. 3).

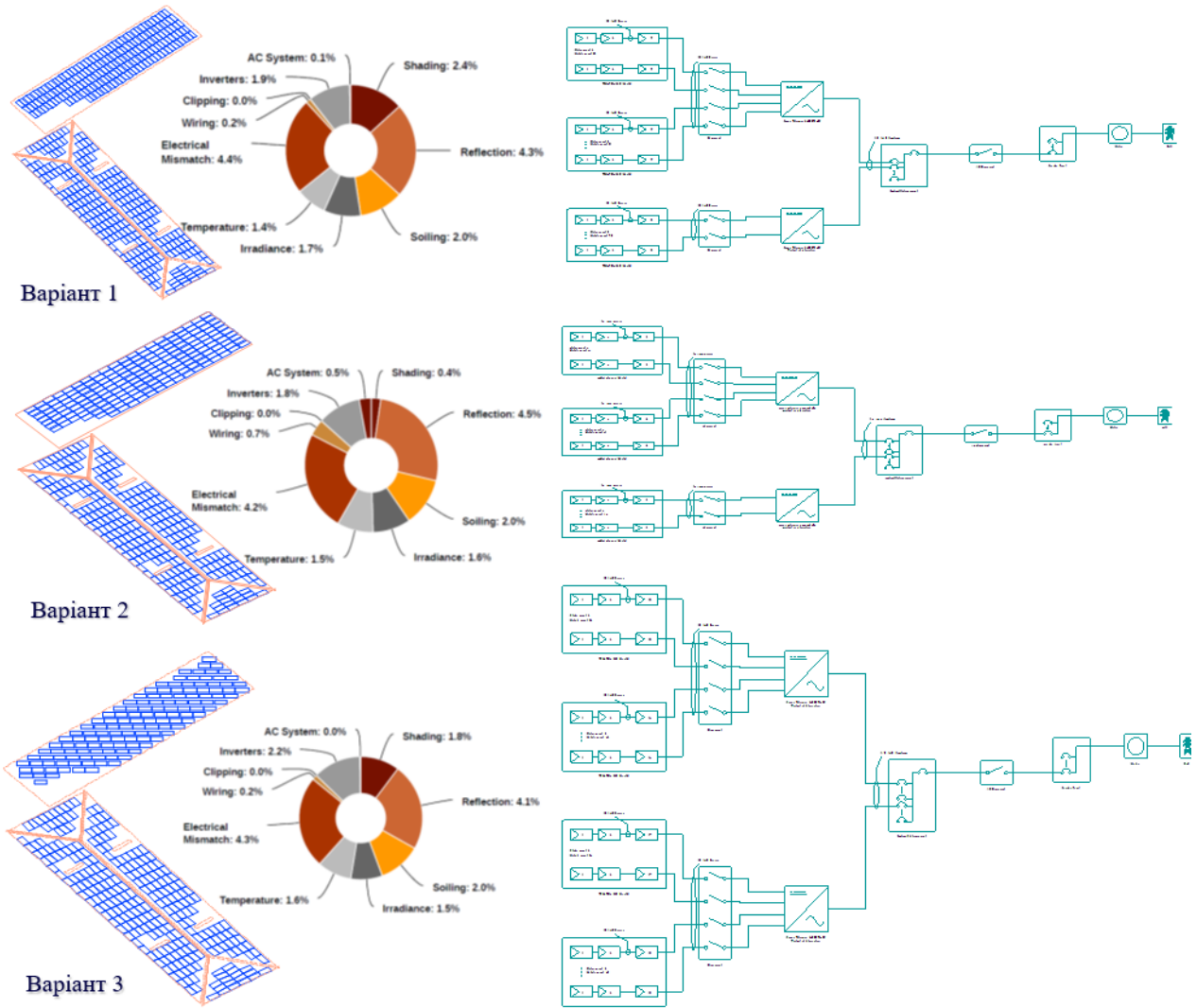


Рисунок 2 – Звіт з моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі», візуалізовано в HelioScore [3]

Таблиця 1

**Загальні технічні показники мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі»**

Параметр	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Номінальна потужність, кВт	143,68	143,04	125,44
Ефективність перетворення, %	83,0	85,0	83,4
Продуктивність, кВт·год/кВт·пік	887,8	943,1	954,6
Разом за рік	127 555,5	134 901,6	119 740,4

В роботі проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження проекту мережевої фотоелектричної станції дахового типу для

офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі».

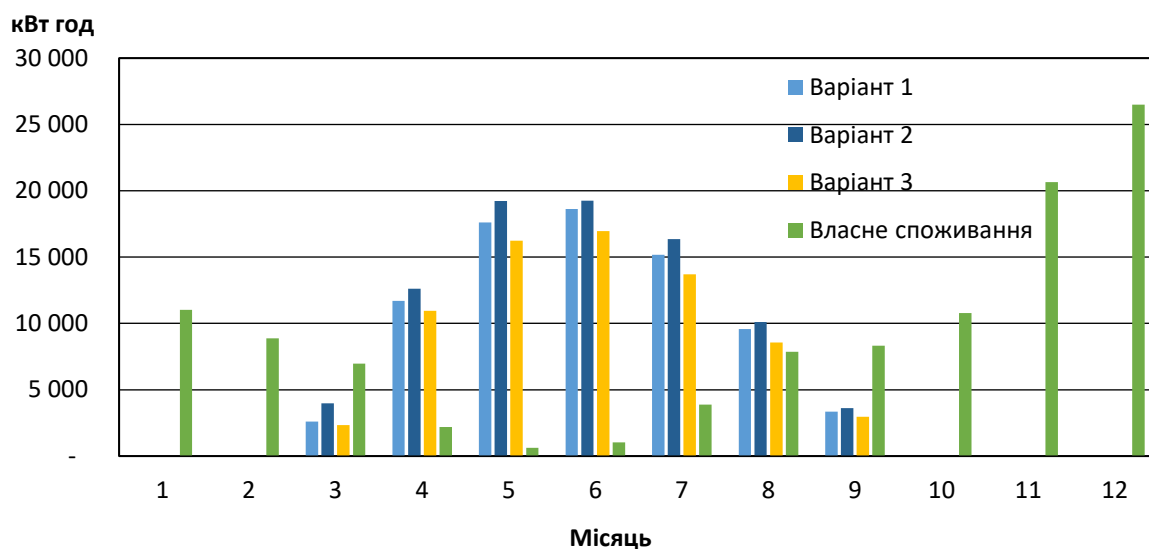


Рисунок 3 – Генерація електричної енергії в мережу фотоелектричною станцією дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі»

Визначено кількість електричної енергії, яку споживатиме із мережі офісна будівля ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» після впровадження проєкту мережевої фотоелектричної станції та запропоновано інтегрований варіант переходу у формат комерційної станції з можливістю продажу електроенергії в мережу за «зеленим» тарифом, у разі якщо будуть виконані всі необхідні для цього законодавчі вимоги. Також визначено кількість електричної енергії, яка може бути продана в мережу за «зеленим» тарифом та за цим показником розраховано прибутковість і окупність варіантів проєкту.

Найкращим за техніко-економічними показниками (терміном окупності, рентабельністю та внутрішньою нормою прибутковості) є варіант 2.

За результатами розрахунку визначено, що  $IP > 1$  за всіма розглянутими варіантами, відповідно проєкт мережевої фотоелектричної станції дахового типу для офісної будівлі ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі» можна вважати ефективним і може бути рекомендованим до впровадження на практиці.

### Список літератури:

1. Сонячні електростанції: ефективні бізнес-моделі для компаній [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/soniachni-elektrostantsii-efektyvni-biznes-modeli-dlia-kompanii> (дата звернення: 06.05.2026). – Назва з екрана.
2. Офіційний сайт ДТЕК [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.dtek-kem.com.ua> (дата звернення: 06.05.2026). – Назва з екрана.
3. HelioScope [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.helioscope.com> (дата звернення: 06.05.2026). – Назва з екрана.

УДК 621.311.21

## ПРОБЛЕМАТИКА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ПОТОКУ РІДИНИ

К.т.н., доц. Майдан П.С., к.т.н., доц. Машовець Н.С., Коломієць Я.О.  
*Хмельницький національний університет, м. Хмельницький*  
maidanp@khmnu.edu.ua

На сучасному етапі розвитку промисловості гідроенергетика, безперечно, відіграє дуже важливу роль. Досвід провідних світових країн показує, що саме гідроенергетика є тим, що підтримує енергетичний баланс на нашій планеті. Згідно зі загально відомою статистикою, у 2018 році гідроенергетика досягла близько 20 % від загального обсягу виробленої електричної енергії та близько 70 % від усієї енергії, яка рахується відновлюваною. Судячи із сміливих прогнозів енергетиків, слід очікувати зростання приблизно на 40 % до 2030 року [1-5].

Проте є деякі недоліки, пов'язані із гідро електричною енергією, але дані недоліки перекидає значно вища кількість наявних переваг. Вартість гідро електроенергії є відносно низькою, що робить гідроенергетику одним із найбільш конкурентоспроможних джерел відновлюваної енергії. Крім того, на відміну від ТЕС і АЕС, ГЕС не споживають воду в процесі роботи. У певній місцевості є необхідність у створенні греблі або водосховищі, з установкою легко контролювати кількість енергії, що виробляється станцією, що робить її надзвичайно гнучкою в роботі.

Загальна статистика показує, що частка використання міні-ГЕС та малих ГЕС у світі неспинно зростає. Невелика ГЕС зазвичай може виробляти електроенергію для промислового підприємства або невеликій громаді. Незважаючи на те, що кожна країна має свою максимальну межу для генерації електричної енергії, верхньою межею визначено саме 10 МВт, що вже можна назвати ГЕС. Безліч прикладів, які вже існують у світі, показують, що в останні роки в таких країнах, як КНР, Японія, США, Чилі та Індія, збільшувалося виробництво гідро електроенергії в достатньо невеликих обсягах.

Проекти міні-ГЕС зазвичай мають максимальну потужність до 100 кВт, використовуються для забезпечення електроенергією невеликих населених пунктів або віддалених приватних будинків. Такі ГЕС зазвичай зустрічаються в країнах, що розвиваються, їх використовують як доповнення до фотоелектричних систем сонячної енергії.

Малі та міні-ГЕС уловлюють енергію руху потоку води та виконують перетворення цієї енергії на корисну електричну енергію. Незважаючи на те, що малі та міні-ГЕС значною мірою залежать від руху потоку води, вони можуть забезпечити надійну, чисту та доступну електроенергію [6-8].

Україна має значний гідроенергетичний потенціал для розвитку малої гідроенергетики, що зумовлено розгалуженою мережею річок і водотоків на всій території країни. За оцінками фахівців, технічно придатний потенціал малих річок України становить близько 3-4 ГВт встановленої потужності, з

якого на сьогоднішній день освоєно лише незначну частину. Найбільш сприятливими регіонами для розміщення міні-ГЕС є Карпатський регіон – Львівська, Закарпатська, Івано-Франківська та Чернівецька області – де гірські річки характеризуються значними ухілами русла і стабільним водним стоком протягом більшої частини року. Подільський та Волинський регіони також мають помітний потенціал завдяки розвиненій мережі середніх і малих річок, що дозволяє розглядати їх як перспективні зони для розширення малої гідроенергетики в середньостроковій перспективі. Станом на початок 2020-х років в Україні функціонувала значна кількість міні- і мікро-ГЕС, однак їх загальна встановлена потужність залишалась відносно невеликою на тлі загального енергобалансу країни.

Руйнування або пошкодження значної частини потужностей теплової генерації і трансформаторного обладнання електричних підстанцій призвело до критичного дефіциту електроенергії, масових відключень споживачів і гострої необхідності диверсифікації джерел генерації. У цих умовах малі і розподілені джерела енергії – до яких відносяться і міні-ГЕС – набули принципово нового стратегічного значення, оскільки їх децентралізований характер робить їх значно більш стійкими до ракетних і дронних атак порівняно з великими централізованими електростанціями. Знищення або виведення з ладу однієї великої теплової чи атомної електростанції призводить до втрати сотень мегават потужності, тоді як аналогічний вплив на розподілену мережу міні-ГЕС матиме значно менший кумулятивний ефект через фізичну розосередженість об'єктів генерації по всій території країни.

Сучасна тенденція до децентралізації електроенергетики і розвитку концепції мікромереж (microgrid) відкриває нові можливості для інтеграції міні-ГЕС у локальні системи електропостачання окремих населених пунктів, промислових підприємств або об'єктів критичної інфраструктури. Мікромережа являє собою локальну електричну мережу, що поєднує декілька джерел генерації – наприклад, міні-ГЕС, сонячні панелі і акумуляторні батареї – і здатна працювати як в режимі підключення до загальної енергосистеми, так і в автономному острівному режимі у разі її аварійного відключення. Для гірських і передгірських громад Карпатського регіону, де наявні придатні водотоки, міні-ГЕС у складі такої мікромережі може забезпечувати базове електропостачання цілодобово, що є особливо цінним в умовах планових і аварійних відключень централізованої мережі. Важливим технологічним напрямом є також розробка і впровадження систем автоматизованого дистанційного керування міні-ГЕС на основі мікроконтролерних і SCADA-систем, що дозволяє суттєво скоротити операційні витрати за рахунок зменшення чисельності обслуговуючого персоналу і підвищити надійність роботи обладнання завдяки безперервному моніторингу ключових параметрів. Водночас розвиток міні-ГЕС в Україні стикається з рядом суттєвих проблем і обмежень, що стримують реалізацію наявного потенціалу. Однією з головних перешкод є складність і тривалість процедури отримання дозвільної документації на будівництво гідротехнічних споруд – проектування, екологічна експертиза, отримання водного дозволу, погодження з органами місцевого

самоврядування і контролюючими органами можуть займати декілька років, що суттєво знижує інвестиційну привабливість проєктів малої гідроенергетики. Екологічна складова також є принципово важливим аспектом, оскільки будь-яке гідротехнічне будівництво на водотоці неминуче впливає на гідрологічний режим річки, умови нересту риби і стан прибережних екосистем. Сучасні підходи до проєктування міні-ГЕС передбачають обов'язкове забезпечення санітарного попуску – мінімального обсягу води, що залишається у природному руслі для підтримання екологічного стану річки – а також встановлення рибозахисних пристроїв і рибоходів для збереження іхтіофауни. Фінансові бар'єри є ще одним вагомим стримуючим чинником для розвитку малої гідроенергетики в Україні. Питомі капітальні витрати на будівництво міні-ГЕС є значно вищими у перерахунку на одиницю встановленої потужності порівняно з великими ГЕС, а терміни окупності при поточних тарифах і рівнях ризику можуть становити 10-15 років навіть при сприятливих умовах фінансування. Скорочення розміру «зеленого» тарифу, що відбувалось в Україні у 2020-2021 роках, ускладнило фінансову модель нових проєктів і призвело до зупинки або заморожки частини інвестиційних ініціатив у сфері відновлюваної енергетики. Крім того, воєнний стан і пов'язана з ним загальна економічна нестабільність суттєво підвищили вартість фінансування і знизили доступність банківських кредитів для реалізації інфраструктурних проєктів з тривалими термінами окупності [1-5].

Незважаючи на зазначені труднощі, перспективи розвитку міні-ГЕС в Україні в середньо- і довгостроковій перспективі залишаються позитивними з урахуванням кількох ключових факторів. По-перше, в рамках повоєнного відновлення України очікується суттєве залучення міжнародного фінансування з боку ЄС, Світового банку і двосторонніх донорів на реалізацію проєктів у сфері відновлюваної енергетики і підвищення енергетичної незалежності країни. Програма REPowerEU [9, 10] і стратегічні документи ЄС щодо підтримки енергетичного переходу в країнах-партнерах передбачають фінансування саме децентралізованих і відновлюваних джерел енергії, що відповідає концепції міні-ГЕС як елементу розподіленої генерації. По-друге, євроінтеграційний курс України передбачає поступову адаптацію національного законодавства у сфері відновлюваної енергетики до вимог директив Євросоюзу, що сприятиме спрощенню дозвільних процедур і підвищенню прозорості регуляторного середовища для інвесторів. По-третє, технологічний прогрес у сфері гідроагрегатів малої потужності – зокрема, розробка безгребельних проточних турбін типу Archimedes Screw і підводних осьових турбін – відкриває можливості для будівництва міні-ГЕС на водотоках з мінімальним екологічним втручанням і без суттєвих гідротехнічних споруд, що дозволяє значно спростити і здешевити реалізацію проєктів.

Таким чином, міні-ГЕС є перспективним і стратегічно важливим елементом майбутньої енергетичної системи України, що поєднує переваги відновлюваності, стабільності генерації, децентралізованості і відносної стійкості до зовнішніх деструктивних впливів. Подолання існуючих регуляторних, фінансових і екологічних бар'єрів у поєднанні з

цілеспрямованою державною підтримкою і міжнародним фінансуванням може забезпечити реалізацію значної частини наявного гідроенергетичного потенціалу малих річок України і суттєво посилити енергетичну безпеку країни в умовах тривалої збройної агресії та у повоєнний період відновлення [1-5].

Описано проблематику використання енергії потоку рідини в малих річках на території України.

### Список літератури:

1. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики України. Аналітична доповідь. НІСД, 2014. – 54 с.

2. Гідроенергетика: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: В.І. Будько, П.Ф. Васько, С.Т. Пазич. / КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 13,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 205 с.

3. Принципи збалансованого розвитку гідроенергетики: Аналітичний документ / Г.К. Веремійчик та ін. – Київ: Видавництво «Фенікс», 2018. – 20 с. ISBN 978-966-136-549-9

4. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://msn.khmnu.edu.ua/course/view.php?id=5643>. – Назва з екрану.

5. Значення гідроенергетики в розвитку ОЕС України відповідно до НЕС-2035 і екологічні виклики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uhe.gov.ua/media\\_tsentr/novyny/znacenna-gidroenergetiki-v-rozvitku-oes-ukraini-vidpovidno-do-nes-2035-i](https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/znacenna-gidroenergetiki-v-rozvitku-oes-ukraini-vidpovidno-do-nes-2035-i) – Назва з екрану.

6. Li H. Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient / H. Li, D. Chen, F. Wang, H. Zhang // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME. – 2017. – 139. – 101002.

7. Dietz A. Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator / A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler // Proceedings 1st International Electric Drives Production Conference, 2011. – P. 93-100.

8. Wegiel T. Variable speed small hydropower plant / T. Wegiel, D. Borkowski // Proceedings 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2012. – P. 167-174.

9. REPowerEU: план швидкого зменшення залежності від російського викопного палива та прискорення «зеленого» переходу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sae.gov.ua/news/repowereu-plan-svidkogo-zmensennia-zaleznosti-vid-rosiiskogo-vikopnogo-paliva-ta-priskorennia-zelenogo-perexodu> – Назва з екрану.

10. REPowerEU: План стрімкого зниження залежності від російського викопного палива і швидкого просування «зеленого переходу» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/ip\\_22\\_3131](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/ip_22_3131) – Назва з екрану.

УДК 621.383.51

## ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ФАСАДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА ПРИКЛАДІ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ПРОЄКТУ 111-94

К.т.н., доц. Курак В.В., Качан В.А.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький  
vk\_74@ukr.net*

Науковий керівник: к.т.н., доц. Курак В.В.

Пришвидженню темпів впровадження розподіленої електричної генерації може посприяти інтеграція фотоелектричних систем в урбаністичне середовище. В умовах міської багатоповерхової забудови площа фасадів будівель може значно перевищувати площу їх даху, що дає потенційну перевагу фасадним фотоелектричним системам над даховими [1].

В даній роботі представлено оцінку потенціалу вироблення електричної енергії фасадною фотоелектричною станцією за умов розташування сонячних модулів на огороженні балконів і лоджій дев'ятиповерхового житлового будинку проєкту 111-94 для кліматичних умов м. Херсон.

Панельні дев'яти- та десятиповерхові житлові будинки різних серій типового проєкту 111-94 є одними з наймасовіших у м. Херсоні (рис. 1). Цей проєкт багатоквартирних будинків був головним при інтенсивній забудові таких мікрорайонів міста, як Шуменський, Північний, Таврійський, Корабелів в період з середини 1970-х до початку 1990-х років.



Рисунок 1 – Дев'ятиповерховий житловий будинок проєкту 111-94 у м. Херсон

З кінця 1970-х до середини 1980-х років при будівництві панельних девятиповерхівок у м. Херсоні перевага надавалась серії, що мала збільшену до 6 м довжину балконів в плануванні двокімнатних квартир, в той час як для однокімнатних та трикімнатних квартир довжина балконів і лоджій становила близько 3 м (рис. 2).

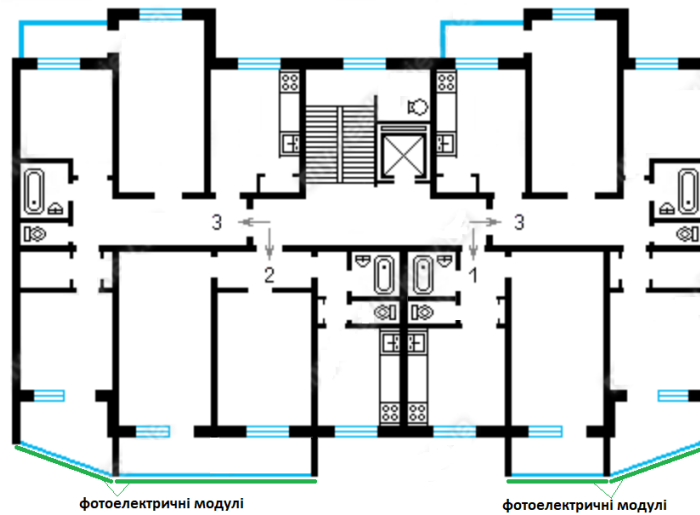


Рисунок 2 – Планування типового поверху будинку проєкту 111-94 (зеленим кольором позначено пропоновані площі для розташування фотоелектричних модулів)

В таких будинках загальна площа огорожень балконів і лоджій є доволі значною, і з боку фасаду однокімнатних та двокімнатних квартир становить близько  $15 \text{ м}^2$  на кожен поверх під'їзду, що робить привабливою ідею спорудження фасадної фотоелектричної станції з монтажем модулів на цих поверхнях (див. рис. 2) за умови їх південної орієнтації.

Як показано в [2], система з фотоелектричними модулями, розташованими на південному фасаді, в кліматичних умовах м. Херсон здатна забезпечити річне питоме вироблення електричної енергії загальним обсягом близько  $108 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ , причому розорієнтація приймальної поверхні модулів від південного напрямку на кут  $\pm 30^\circ$  не призводить до помітного зменшення цього обсягу. Отже, для будинку проєкту 111-94, який просторово орієнтований так, що його фасад з боку однокімнатних та двокімнатних квартир є південним, за рік можна отримати з кожного поверху під'їзду  $108 \times 15 = 1620 \text{ кВт}\cdot\text{год}$  генерованої електричної енергії. За умов покриття всіх поверхонь огорожень балконів і лоджій з боку південного фасаду фотоелектричними модулями, починаючи з другого поверху і вище, кожен під'їзд за рік здатен буде згенерувати  $1620 \times 8 = 12\,960 \text{ кВт}\cdot\text{год}$  електричної енергії, що еквівалентно середньорічній потребі від 4 до 7 квартир такого будинку.

### Список літератури:

1. Курак В. Перспективи використання фотоелектричних фасадів під час повоєнного відновлення будівель / В. Курак, О. Андропова // Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні Херсонщини: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ХНТУ, 26–28 квітня 2023 р.) у 2-х т. ; Т. 1 / за ред. О. В. Чепелюк. – Одеса : Олді+, 2023. – С. 265-268.

2. Курак В.В. Оцінка вироблення енергії фасадними фотоелектричними системами в кліматичних умовах м. Херсон / В.В. Курак, О.В. Андропова, І.Ф. Погребняк // Вісник ХНТУ. – 2024. – №4(91). – С. 85 – 90.

УДК 697.7

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОМУ ТЕПЛОПОСТАЧАННІ

Геймур В.О., к.т.н., доц. Клімов Р.О.

*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське*  
klroma@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Клімов Р.О.

Найбільш сприятливими умовами для використання теплонасосних установок є наявність вторинних енергоресурсів промислових підприємств, природних джерел теплоти, а також споживачів з постійним тепловим навантаженням низького потенціалу (системи гарячого водопостачання та опалення, теплотехнологічні процеси з температурним рівнем до 350 К) [1]. У цих умовах теплонасосні установки як за енергетичними показниками, так і за приведеними витратами стають конкурентоспроможними джерелами теплової енергії, в порівнянні з сучасними котельними установками. Для задоволення сезонних теплових навантажень, що змінюються в широкому діапазоні температур, доцільно застосовувати теплонасосні установки в поєднанні з піковими котельними таким чином, щоб базова частина цілорічного навантаження покривалася від теплонасосних установок, а пікова частина навантаження задовольнялася від пікового котла. При мінімальних температурах зовнішнього повітря необхідно здійснювати максимальний підігрів, причому, як правило, максимум опалювального навантаження збігається з електричним максимумом енергосистеми. Передача пікового навантаження опалення на піковий котел суттєво знижує капітальні витрати на всю систему теплопостачання. Враховуючи цю обставину особливо важливо використовувати вже існуючі котельні при модернізації систем теплопостачання, які покривають пікове навантаження опалення в поєднанні з застосуванням теплонасосних установок.

Розділення конденсатора теплового насоса на два окремі теплообмінники [2], в одному з яких перегріта пара робочого тіла стає насиченою, а в другому відбувається тільки процес конденсації робочого тіла, призводить до підвищення енергетичної ефективності роботи теплонасосної установки в цілому.

### Список літератури:

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств: навч. посіб./ Р.О. Клімов. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 200 с.
2. Арсен'єв В.М. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навч. посіб. / В.М. Арсен'єв, С.С. Мелейчук. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с.

УДК 621.311

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДАХОВОГО ТИПУ ДЛЯ КП «ДНІПРОВСЬКИЙ»

Корнієнко О.О., Шаповал А.О., к.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л.  
*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
don.natalia@kntu.edu.ua

Науковий керівник: к.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л.

В даній роботі з використанням сучасного програмного забезпечення з фотовольтаїки HelioScore [1] розроблено структурну схему мережевої фотоелектричної станції дахового типу для КП «Дніпровський» (м. Херсон) та проведено моделювання її роботи.

На дахах будівель КП «Дніпровський» передбачено розміщення блоків фотоелектричних модулів Trina Solar TSM та стрингових мережевих інверторів Sunny Tripower 24000TL-US (SMA). Фотоелектричні модулі встановлено суцільним масивом під кутом нахилу покрівлі із врахуванням можливості оптимального використання поверхонь для встановлення фотоелектричних модулів.

Схема розміщення фотоелектричних модулів на дахах будівель КП «Дніпровський» наведена на рис. 1.

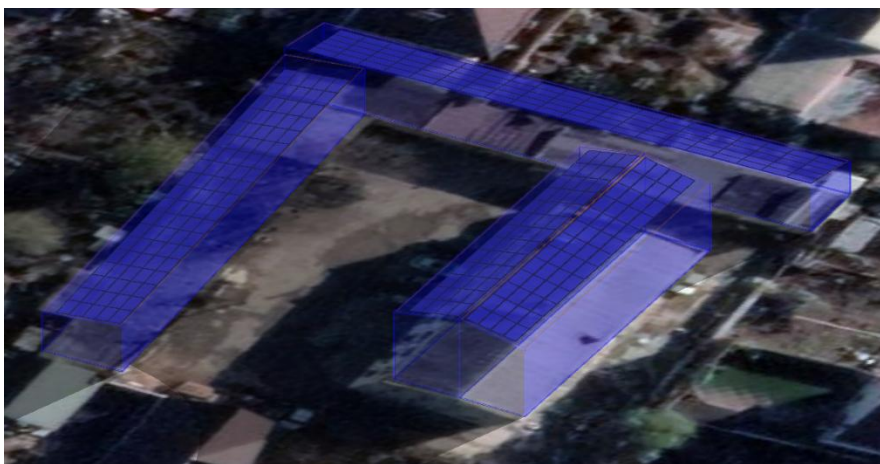


Рисунок 1 – Схема розміщення фотоелектричних модулів на дахах будівель КП «Дніпровський», візуалізована в HelioScore [1]

В програмному середовищі HelioScore [1] розроблено дизайн для трьох варіантів конфігурації мережевої фотоелектричної станції дахового типу, які відрізняються потужностями фотоелектричних модулів:

*варіант 1* – Trina Solar TSM-PD14 320 (потужністю 320 Вт);

*варіант 2* – Trina Solar TSM-DEG18MC.20 500 (потужністю 500 Вт);

*варіант 3* – Trina Solar TSM-NE21 700 (потужністю 700 Вт).

Структурна електрична схема фотоелектричної станції дахового типу для комунального підприємства «Дніпровський», отримана моделюванням в

HelioScore [1], наведена на рис. 2.

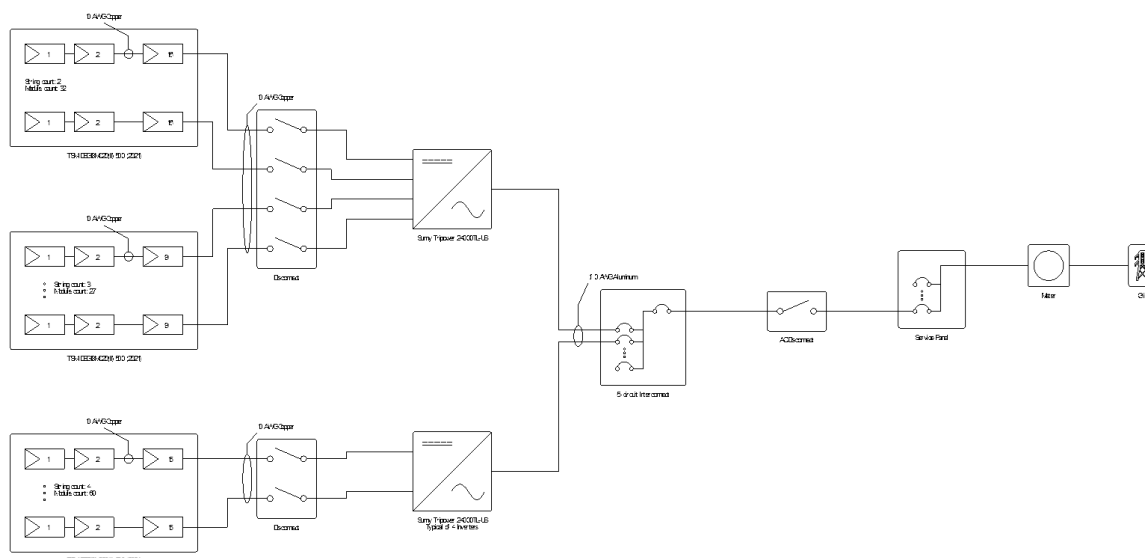


Рисунок 2 – Структурна схема електрична мережевої фотоелектричної станції дахового типу для КП «Дніпровський», візуалізована в HelioScore [1]

Моделюванням роботи мережевої фотоелектричної дахового типу в HelioScore [1] визначено структуру втрат в системі фотоелектричної станції, що враховує втрати в інверторах, втрати в мережі постійного струму, втрати в мережі змінного струму, втрати через затінення чи забруднення фотоелектричних модулів, зменшення потужності фотоелектричного модуля через його перегрівання тощо. Звіти з моделювання наведені на рис. 3.

За результатами моделювання роботи станції визначено усереднене значення генерації електричної енергії мережевою фотоелектричною станцією в мережу впродовж року з урахуванням втрат в складових системи. Загальні технічні показники мережевої фотоелектричної станції дахового типу КП «Дніпровський», визначені за результатами моделювання, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Загальні технічні показники мережевої фотоелектричної станції дахового типу КП «Дніпровський»**

Параметр	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Номінальна потужність, кВт	129,28	149,5	179,9
Ефективність перетворення, %	84,2	84,6	84,8
Продуктивність, кВт·год/кВт·пік	1146,2	1150,3	1150,5
Разом за рік	148 182,6	171 977,2	206 966,7



Рисунок 3 – Звіт з моделювання роботи мережевої фотоелектричної дахового типу для КП «Дніпровський», візуалізовано в HelioScore [1]

В рамках дослідження визначено кількість електричної енергії, що може бути передана в мережу та за цим показником розраховано прибутковість та окупність варіантів проекту, яке показало, що в повоєнному відновленні Херсона досить перспективним буде використання дахів будівель КП «Дніпровський» для розміщення мережевої фотоелектричної станції дахового типу з метою покриття власного споживання та продажу надлишків електричної енергії за «зеленим» тарифом.

### Список літератури:

1. HelioScope: Advanced Solar Design Software [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://app.helioscope.com/projects/5004280/reports/17269400> (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрана.

УДК 621.311.21:519.7

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ З УДОСКОНАЛЕНОЮ СТРАТЕГІЄЮ ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Панфілов А.І., к.ф.-м.н., доц. Івченко В.В.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
reterty@gmail.com

Науковий керівник: к.ф.-м.н., доц. Івченко В.В.

Особливу увагу останніми роками приділяють розподіленим мережам та мало- і середньо-потужним ВЕУ діапазоном 20–100 кВт, які наразі становлять понад 80 % світового ринку підключених до мережі вітроустановок [1]. Проте більшість комерційних рішень у цьому сегменті мають спрощену конструкцію, відсутність систем зміни кута нахилу лопатей (pitch) та орієнтації на вітер (yaw), а також використовують однотипні, часто неефективні методи керування. Це призводить до зниження коефіцієнта захоплення вітрової енергії при змінних атмосферних умовах.

Імітаційне моделювання стало незамінним інструментом дослідження ВЕУ завдяки можливості відтворення динаміки системи без залежності від погодних умов, з мінімальними фінансовими витратами та ризиками для обладнання. Сучасні дослідження зосереджені на моделюванні вітрових характеристик, параметрів вітропарків, систем автоматичного керування, динаміки турбіни та розробці комплексних імітаційних моделей. У даній роботі запропоновано повну математичну модель мало- та середньо-потужної безредукторної ВЕУ, а також удосконалену стратегію відстеження точки максимальної потужності, верифіковану шляхом порівняльного імітаційного моделювання.

Для опису динаміки вітроустановки використовували спрощену модель приводу, в якій ротор і генератор розглядаються як єдина жорстка система. Рівняння руху визначається балансом моментів:

- механічного моменту від вітру,
- електромагнітного моменту генератора,
- моменту сили опору, пропорційного миттєвої кутової швидкості обертання валу.

Така модель дозволяє адекватно описати поведінку системи при зміні швидкості вітру та оцінити інерційні властивості установки.

Ротор синхронного генератора із постійними магнітами формує магнітне поле за рахунок вбудованих постійних магнітів. Крутний момент виникає внаслідок взаємодії роторного поля з обертовим магнітним полем, що створюється струмами статора.

Математичний опис здійснюється у dq-координатній системі, що дозволяє спростити аналіз електромагнітних процесів. Основними змінними такої моделі є:

- струми по осях  $d$  і  $q$ ,
- індуктивності,
- опір статора,
- кутова швидкість,
- магнітний потік.

За умови рівності індуктивностей по осях модель спрощується, що зручно для числових розрахунків.

Одним із найбільш поширених підходів керування є метод оптимального моменту, який забезпечує роботу генератора у точці максимальної потужності. У класичній топології без урахування мережевого перетворювача використовується закон керування:

$$M_{opt} = k_{opt}\omega^2, \quad (1)$$

де  $k_{opt}$  – оптимальний коефіцієнт посилення, що визначається аеродинамічними параметрами турбіни. Імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink при початковій швидкості вітру 5 м/с та ступінчастому зростанні до 6 м/с у момент  $t = 4$  с показало, що швидкість обертання зростає з 87,5 до 97,5 об/хв, а вихідна потужність – з 3,0 до 5,3 кВт. Проте перехідний процес триває близько 2 с. Через інерційність ротора та нелінійність аеродинамічного моменту швидкість та момент не встигають миттєво узгоджуватися з коефіцієнтом посилення, що призводить до відхилення від оптимальної кривої та зниження загального захоплення енергії.

Для усунення зазначеного недоліку нами запропоновано вводити компенсаційну складову  $\Delta M$  до заданого моменту:

$$M_{opt} = k_{opt}\omega^2 + \Delta M. \quad (2)$$

Оптимізація величини  $\Delta M$  здійснюється за допомогою генетичного алгоритму (ГА), який забезпечує швидкий вихід на точку максимальної потужності без стійких коливань. Алгоритм реалізується у п'ять етапів:

1. Ініціалізація популяції: при зростанні швидкості генератора обираються 10 точок у діапазоні від  $M_0$  до  $M_{opt}$  як початкові значення заданого моменту.
2. Формування функції пристосованості: як цільову змінну обрано абсолютне відхилення швидкості між поточним та попереднім поколіннями.
3. Відбір: застосовується пропорційний метод відбору. Індивіди з вищою пристосованістю мають більшу ймовірність потрапити до наступного покоління.
4. Рекомбінація та мутація: на перших ітераціях встановлюється висока ймовірність мутації для широкого пошуку, яка поступово знижується для точного налаштування.
5. Формування нового покоління: процес повторюється доти, доки відхилення швидкості не стабілізується.

Для перевірки ефективності запропонованого підходу проведено порівняльне моделювання двох стратегій керування при однакових умовах: початкова швидкість вітру 5 м/с, стрибок до 6 м/с у момент часу  $t = 4$  с.

Результати демонструють, що при використанні удосконаленого методу перехід від старої до нової оптимальної швидкості та потужності відбувається значно швидше. Час відновлення стійкого стану скорочується з  $\sim 2$  с (традиційний метод) до  $\sim 1$  с (удосконалений метод). Таким чином, введення генетично оптимізованої компенсації моменту суттєво покращує динамічні характеристики генератора, зменшує час пошуку точки максимальної потужності та підвищує загальний коефіцієнт використання вітрової енергії, особливо в умовах частих та стрибкоподібних змін швидкості вітру.

**Список літератури:**

1. Zhao Z. A critical review of factors affecting the wind power generation industry in China. / Z. Zhao, Y. Hong, Z. Jian // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – №19(6). – P. 499-508.

УДК 620.9

## РОЗРОБКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД ФЕС

Харченко Є.С., к.т.н., доц. Погребняк І.Ф.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*

rohrebnyak.iryna@kntu.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Погребняк І.Ф.

Розробка біогазової установки, що працює в синергії з фотоелектричними станціями, є ефективним рішенням для забезпечення енергонезалежності, адже дозволяє нівелювати переривчастий характер сонячної генерації за рахунок стабільного виробництва біогазу.

Поєднання фотоелектричної станції та біогазової установки дозволяє створити гібридну енергосистему:

- фотоелектрична станція вдень забезпечує електроенергією роботу насосів, мішалок, систем автоматизації та підігріву біореактора;

- біогазова установка цілодобово переробляє органічні відходи (гній, жом, силосні залишки) у біогаз, який спалюється для виробництва електроенергії та тепла (когенерація), коли фотоелектрична станція не працює;

- використання власної електроенергії від ФЕС знижує собівартість біогазу.

Для розгляду такої гібридної енергосистеми було прийнято, що фермерське господарство займається крупною рогатою худобою (бики та дійні корови).

По-перше, було проведено розрахунок біогазової установки – є основним при проектуванні БГУ – це дозволяє і оптимізувати процес виробництва біогазу, і забезпечити економічну доцільність такого проекту та максимізувати виходи. Задля забезпечення не тільки стійкого, а й прибуткового функціонування біогазової установки маємо обов'язково враховувати як технічні, так і економіко-екологічні фактори [1-3]. Результати розрахунків енергетичного балансу біогазової установки та об'єму товарного біогазу наведені в табл. 1.

Таблиця 1

### Місячні показники енергетичної ефективності

Місяць	$Q_{\text{біогаз}}$ , МДж	$Q_{\text{під}}$ , МДж	$Q_{\text{вт}}$ , МДж	$Q_{\text{бгтов}}$ , МДж	$V_{\text{бг}}$ , м <sup>3</sup>	$V_{\text{бгтов}}$ , м <sup>3</sup>
Січень	752418	111204	17476	624142	5064	25645
Лютий	684513	92103	15812	573000	4284	22954
Березень	752418	99004	17320	635018	4703	25401
Квітень	734349	82586	15912	629856	3973	25226
Травень	752418	60074	11702	680254	2898	27242
Червень	734349	40958	7801	679521	1964	27230
Липень	752418	43278	8215	700215	2054	28062

## Продовження табл. 1

Серпень	752418	38920	7299	716253	1842	28304
Вересень	734349	66018	12842	648598	3195	26010
Жовтень	752418	71754	13814	667012	3416	26800
Листопад	734349	105687	16741	605845	4926	24298
Грудень	752418	109563	17325	626548	5058	25142
РІК	8888835	921149	162259	7786262	43377	312314

Виконані розрахунки енергії необхідної для забезпечення теплових потреб даного фермерського господарства щомісяця. Загальні (річні) результати розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

## Енергія, необхідна для забезпечення теплових потреб

Місяць	$Q_{\text{корівника, МДж}}$	$Q_{\text{житлова буд., МДж}}$	$Q_{\text{господарчі пот., МДж}}$	$Q_{\text{ГВП, МДж}}$
Разом:	792102	119549	255182	66543

Проведено розрахунок генерації електричної енергії фотоелектричною станцією протягом року. Річна генерація електричної енергії фотоелектричною станцією становить 40 018 кВт·год.

Були розглянуті режими спільної роботи біогазової установки та фотоелектричної станції в нормальному режимі та за відсутності електричної мережі. При розгляді першого режиму – ФЕС із системою акумулювання електричної енергії буде покривати протягом року 14 % - 59 % від потреб навантаження. При розгляді другого режиму – ФЕС із системою акумулювання електричної енергії протягом року покриватиме 29 % - 92 % потреб БГУ.

## Список літератури:

1. Фотоенергетика: навч. посіб. [Електронний ресурс]/ Ю.П. Колонтаєвський, Д.В. Тугай, С.В. Котелевець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/55310/1/2019%2028Н%20печ%20ФЕ.%20Посібник%20О.pdf>. – Назва з екрана.

2. Стаднік М.І. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії [Електронний ресурс] / М.І. Стаднік, Д.П. Проценко, С.М. Бабій // Вісник ВПІ. – 2020. – № 4. – С. 32-41. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/31195/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D1%96%D0%BA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. – Назва з екрана.

3. Ратушняк Г.С. Біогазові установки з відновлюваними джерелами енергії термостабілізації процесу ферментації біомаси / Г.С. Ратушняк, О.Г. Лялюк, І.А. Кощєєв. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 110 с.

УДК 621.311

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВІТРО-СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SAM

Ніколенко С.В., Плотніков О.О., к.т.н., доц. Андропова О.В.  
*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
kev\_ku@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Андропова О.В.

Вітро-сонячні системи поєднують у собі переваги фотоелектричних систем та вітроенергетичних установок, дозволяючи урівномірити добовий та внутрішньорічний профіль генерації. Зменшення залежності від погодних умов дозволяє знизити необхідну ємність установки зберігання енергії, підвищити стабільність та надійність енергозабезпечення. Реалізація переваг вітро-сонячної системи потребує дослідження режимів її роботи та прогнозування вироблення енергії для кліматичних умов місцезорозташування та певних режимів споживання енергії об'єктом, що зручно робити із застосуванням спеціалізованих програмних середовищ.

В роботі проведено розробку вітро-сонячної системи енергозабезпечення та моделювання її роботи в програмному середовищі System Advisor Model (SAM).

Об'єкт розташований в кліматичних умовах м. Херсон, середньомісячне споживання задано на рівні 1000 кВт·год. Моделювання графіків навантаження показало, що пікова потужність становить 4,1 кВт, а максимальне добове споживання 55 кВт·год/добу. Виходячи з цих даних, а також з урахуванням глибини розряду літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей 80 %, задано енергоємність 68 кВт·год та потужність 4,7 кВт установки зберігання енергії, розрахованої на покриття добового навантаження. При цьому задано умови диспетчеризації: установка зберігання енергії може заряджатися тільки від вітро-сонячної системи в моменти, коли генерація перевищує навантаження, а розряд відбувається в моменти, коли споживання перевищує генерацію.

З використанням бази обладнання підібрано компоненти вітро-сонячної установки: потужність фотоелектричного генератора на основі модулів Trina Solar TSM-500DEG18MC.20 становить 4,5 кВт, а підбір вітроенергетичних установок показав найбільше вироблення енергії та КВВП 29,9 % для установки WES5 2.5kW Tulip для кліматичних умов м. Херсон (рис. 1).

Для заданих параметрів проведено симуляцію роботи системи енергозабезпечення. Програма SAM на основі моделювання погодинних профілів навантаження та генерації енергії вітро-сонячною системою визначає щомісячні дані щодо генерації енергії (рис. 2, а), а також кількість енергії від вітро-сонячної системи, мережі та установки зберігання, що спрямовані на покриття навантаження (рис. 2, б). Енергія, що генерується гібридною вітро-сонячною системою на 47 % складається з перетвореної енергії сонячного випромінювання та на 53 % з енергії вітру.

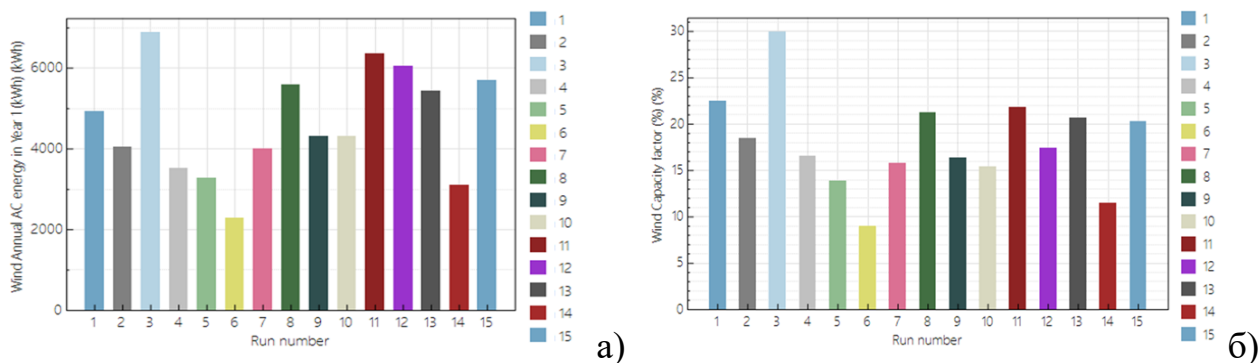


Рисунок 1 – Підбір вітроустановки за виробленням енергії (а) та коефіцієнтом використання встановленої потужності (б):

1 – NREL 2.5kW; 2 – Xzeres 110; 3 –WES5 2.5kW Tulipo; 4 – Southwest Windpower Skystream 1.9kW; 5 – Samrey Merlin 3kW; 6 – Joliet Cyclone 2 2.3kW; 7 – Kingspan-Proven Kingspan KW3 2.5kW; 8 – Kestrel e400i; 9 –Travere 3kW; 10 – Kestrel 400i 3kW; 11 – ReDriven 3kW; 12 – Joliet Cyclone 3 3kW; 13 – Whisper 500 (WPT 3000); 14 – Westwind 3kW; 15 – Hummer 2kW

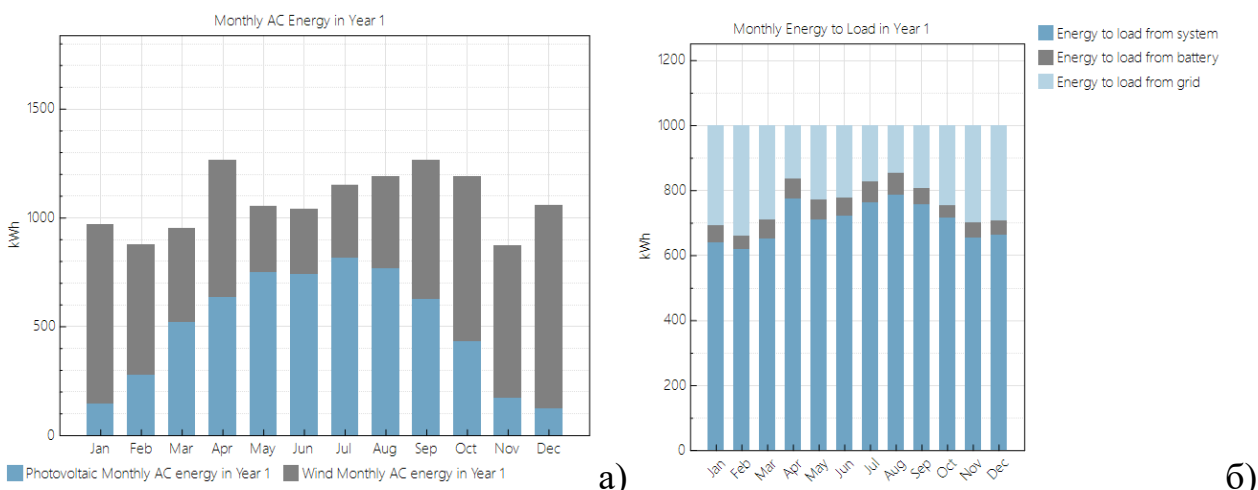


Рисунок 2 – Вироблення енергії вітро-сонячною системою (а) та покриття навантаження об'єкта (б)

Хоча кількість генерованої енергії вітро-сонячною системою 12,88 МВт·год/рік перевищує річне споживання 12 МВт·год, жодного місяця не відбувається повного покриття навантаження, що пов'язано із неспівпадінням графіків генерації та споживання. Частка покриття навантаження за рахунок відновлюваних джерел енергії коливається від 66 % в лютому до 85% в серпні, в середньому за рік становить 76 %.

За рахунок генерованої вітро-сонячною системою енергії, накопиченою в установці зберігання, покривається 5,4 % навантаження, при цьому кількість циклів заряду-розряду за рік становить 615, ефективність роботи установки зберігання 90,62 %, а скорочення ємності внаслідок деградації 3,1 %/рік.

Оскільки обсяг генерації вітро-сонячної системи незначним чином перевищує споживання, то продаж надлишків виробленої електричної енергії в мережу доцільно проводити за механізмом самовиробництва.

УДК 620.9

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КРИЗИ**

Кривоzub Д.Т.

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро*  
kryvozubdaryna@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Войтенко Ю.В.

У сучасних умовах глобальних викликів, спричинених виснаженням традиційних енергетичних ресурсів, зростанням цін на енергоносії та загостренням екологічних проблем, розвиток відновлюваних джерел енергії набуває все більшої актуальності. Для України це питання має надзвичайно важливе значення через енергетичну кризу, що виникла внаслідок воєнних дій, руйнування інфраструктури та необхідності забезпечення енергетичної незалежності країни.

Надійне та безпечне енергозабезпечення є ключовою складовою стабільного функціонування суспільства, адже від нього залежить робота критично важливих об'єктів інфраструктури, промислових підприємств, медичних закладів і житлового сектора. У цьому світлі відновлювані джерела енергії розглядаються як дієвий інструмент для зміцнення стійкості енергосистеми та зменшення залежності від традиційних видів палива.

Україна має значний потенціал для використання сонячної, вітрової енергії, біоенергетики та інших альтернативних джерел, що створює передумови для активного розвитку цієї сфери. Водночас, у цій галузі існує низка викликів, пов'язаних із економічними, технічними та організаційними аспектами, які потребують належного вирішення та підтримки.

Поточний стан української енергетичної галузі відзначається серйозними труднощами, спричиненими руйнуванням об'єктів енергетичної інфраструктури, нестачею потужностей для генерації та зростанням вимог до електромереж. За таких обставин відновлювані енергоресурси постають не просто як заміна звичним джерелам, а як ключовий елемент у зміцненні енергетичної самодостатності країни [1].

Один із найперспективніших шляхів – це нарощування потужностей сонячної генерації. Клімат України сприятливий для експлуатації сонячних установок, особливо на півдні та в центральних областях. Застосування сонячних електростанцій дає змогу суттєво знизити залежність від централізованого електропостачання. На тлі енергетичної вразливості зростає популярність невеликих приватних сонячних систем, що забезпечують автономність домогосподарств та підвищують рівень енергозабезпечення громадян.

Вітрова генерація також володіє вагомим резервом для розширення. Найбільшу віддачу можна отримати від вітрових установок поблизу морських узбереж Чорного моря, а також у степових ландшафтах. Проте впровадження таких проєктів вимагає значних фінансових вкладень та обов'язкового врахування ризиків, пов'язаних із веденням бойових дій. Водночас розвиток вітрової енергетики сприяє урізноманітненню енергобалансу та зняттю надмірного

навантаження з традиційних джерел енергії [2].

Вагому роль відіграє біоенергетика, котра функціонує на основі органічних залишків із сільського господарства, лісової галузі та харчової промисловості. Україна має потужний аграрний потенціал, що створює ідеальні умови для виробництва біопалива. Використання біомаси не лише дає можливість отримувати енергію, а й допомагає вирішити проблему утилізації відходів, мінімізуючи шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Слід зосередити окрему увагу на маломасштабніших гідроенергетичних установах, які можуть бути успішно задіяні у місцевостях з відповідними географічними характеристиками. Незважаючи на те, що їхній внесок у загальний обсяг виробництва енергії є помірним, вони відіграють суттєву роль у задоволенні потреб окремих громад в електриці.

Щодо забезпечення безпеки існування населення, ключовим аспектом стає створення децентралізованих систем постачання енергії. Застосування екологічно чистих джерел живлення як на рівні приватних осель, так і на рівні комерційних та муніципальних об'єктів, підвищує здатність системи витримувати надзвичайні ситуації та мінімізує загрозу перебоїв з електропостачанням. Особливої важливості набуває інтеграція енергозберігаючих рішень, що гарантують незмінність подачі енергії навіть тоді, коли основні генератори не працюють.

Водночас, експансія відновлюваних джерел у межах України стикається з низкою перешкод. Серед головних можна виокремити високі початкові інвестиції у впровадження передових технологій, недостатній рівень розвитку транспортної енергетичної мережі, труднощі зі зведенням потужностей ВДЕ до загальної електромережі, а також недосконалість регуляторних актів. Додатково, в умовах воєнного стану постають підвищені ризики, пов'язані із захищеністю об'єктів енергетики [3].

Значущим чинником для прогресу відновлюваної енергетики слугує зовнішня підтримка та інтеграція українського енергетичного комплексу до європейського ринку. Спільна робота з міжнародними інституціями та залучення фінансових ресурсів сприяють модернізації енергетичного сектору та впровадженню інноваційних рішень.

Таким чином, потенціал використання екологічно чистих джерел енергії в Україні є вельми вагомим і має стратегічне значення для подолання поточної енергетичної скрути. Їхній розвиток не лише посилить енергетичну самодостатність, але й покращить екологічну ситуацію та забезпечить надійні умови для життя громадян.

### Список літератури:

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручн. / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
2. Сегеда М.С. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії: навч. посібник / М.С. Сегеда, М.Й. Олійник, О.Б. Дудурич. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. – 204 с.
3. Титко Р. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України) : навч. посіб. / Р. Титко, В.М. Калініченко. – Варшава: Краків: Полтава: OWG, 2010. – 531 с.

УДК 620.9

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПЕРЕТИНІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ В УМОВАХ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

К.т.н., доц. Загайнова О.А., Попенко К.П., Германчук Д.Д.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
м. Харків*

omsroot@kpi.kharkov.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Загайнова О.А.

Розвиток енергетики останніх десятиліть визначається масштабним використанням відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Головною метою Європейського Союзу (ЄС) є досягнення кліматичної нейтральності (зменшення викидів парникових газів) до 2050 року [1]. Для цього традиційну вуглецеву генерацію змінюють ВДЕ. Однак інтеграція цих генеруючих потужностей створює виклики для управління електроенергетичними системами [2].

Фізичні обмеження магістральних електричних мереж, що не пристосовані до великої кількості ВДЕ, призводить до непередбачуваних та частих перевантажень на лініях. Це змушує системних операторів жорстко обмежувати міжрегіональні перетоки та вдаватися до примусових обмежень зеленої генерації [2].

Традиційно управління загальною пропускною спроможністю TTC (Total Transfer Capability) використовувало детерміновані методи.

Доступна пропускна спроможність АТС (Available Transfer Capability) є похідним комерційним показником, що відображає залишок вільної ємності мережі для реалізації. Базове рівняння доступної пропускної спроможності АТС у момент часу  $t$  визначається як

$$АТС(t) = TTC(t) - ETC - TRM(t), \quad (1)$$

де  $TTC(t)$  – загальна пропускна спроможність,  $ETC$  – існуючі комерційні зобов'язання (Existing Transmission Commitments), а  $TRM(t)$  – маржа надійності передачі (Transmission Reliability Margin) [3].

Саме  $TRM$  відіграє критичну роль у сучасних системах з високою часткою ВДЕ. Цей резервний буфер розраховується для поглинання раптових та непередбачуваних змін у мережі, неточностей прогнозування генерації з ВДЕ та раптових відхилень у споживанні. Розрахунок  $TRM$  детермінованими методами на основі статичних показників «найгіршого сценарію», призводив до штучного заниження комерційно доступної потужності. Проте новітні тенденції вимагають гнучких підходів розрахунку, таких як щорічні оцінки системної надійності або міжрегіональні дослідження пропускної спроможності [3].

Подолання обмежень можливе з використанням ймовірнісного моделювання. Найбільш поширеним підходом сьогодні є впровадження динамічної маржі надійності (Dynamic TRM), яка обчислюється і коригується в

режимі реального часу [3]. Суть методу полягає у використанні статистичного інструменту «рухомого вікна» для аналізу «чистого навантаження», як різниці між сумарним споживанням вузла та генерацією ВДЕ [3]. Практичні дослідження доводять, що інтеграція DTRM дозволяє безпечно вивільнити додаткові обсяги пропускної спроможності (приклад вивільнення понад 93 МВт та 59.5 МВт на мережах в Новій Зеландії). Розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь за допомогою методу Ньютона-Рафсона при цьому гарантує дотримання теплових лімітів ліній та збереження динамічної стійкості [4].

Враховуючи, що повний імовірнісний аналіз потокорозподілу вимагає великих обчислювальних ресурсів, для оптимізації АТС в онлайн-режимі зумовлює активне застосування алгоритмів машинного навчання (ML). Сучасні енергосистеми генерують масиви телеметричних даних через системи SCADA. Ці методи, дозволяють забезпечити швидкий онлайн-розрахунок загальної пропускної спроможності. Застосування нейромережових інструментів у поєднанні з аналізом матриць чутливості дозволяє системним операторам заздалегідь перерозподіляти диспетчерські графіки (re-dispatching) та уникати «вузьких місць» [4].

Технічні розрахунки перетинів мають бути інтегровані в ринкові механізми. У країнах ЄС, до стандартів яких адаптується Об'єднана енергосистема України, триває перехід до ринкової парадигми. На відміну від статичного методу чистої пропускної спроможності (NTC), підхід FBMC (Flow-Based Market Coupling) усуває поняття фіксованих комерційних кордонів. Фізичні обмеження кожного критичного елемента мережі (Critical Network Element, CNE) безпосередньо інтегруються в макрорегіональний алгоритм ринку електричної енергії [5]. Математична оптимізація розраховує залишкову доступну маржу (RAM). Це забезпечує миттєве спрямування надлишків ВДЕ до зон із найвищим ціновим дефіцитом.

Збільшення масштабів інтеграції ВДЕ робить неможливим подальше використання застарілих детермінованих методів розрахунку пропускної спроможності перетинів. Це вимагає комплексної модернізації інженерних інструментів та ринкових механізмів. Перехід до ймовірнісного моделювання, впровадження ML інструментів та адаптація передового ринкового підходу FBMC дозволяють перетворити магістральні електричні мережі на гнучкі інтелектуальні платформи. Це відкриває шляхи для максимізації використання існуючої інфраструктури, підвищення системної гнучкості та створення підґрунтя для надійної торгівлі електроенергією.

### Список літератури:

1. The European Green Deal aims to change the way we produce and consume, making Europe cleaner, healthier and climate neutral [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/> (last access: 11.05.26) – Title from the screen.
2. Edeh U.E. Assessment of Transmission Reliability Margin: Existing Methods and Challenges and Future Prospects / U.E. Edeh, T.T. Lie, M.A. Mahmud // *Energies*. – 2025. – Vol.18, Iss. 9. – 2267. <https://doi.org/10.3390/en18092267>.

3. Edeh U.E. Probabilistic Modeling of Available Transfer Capability with Dynamic Transmission Reliability Margin for Renewable Energy Export and Integration / U.E. Edeh, T.T. Lie, M.A. Mahmud // *Energies*. – 2026. – Vol.19, Iss. 8. – 1864. <https://doi.org/10.3390/en19081864>.

4. Wei C. Calculation of the available transfer capability of trading channels based on power network congestion forecasting / C. Wei, L. Jia, X. Wang, Y. Cai, Y. Huang, Y. Huang, S. Liao // *Frontiers Energy Research*. – 2024. – Vol. 12. DOI:10.3389/fenrg.2024.1351306.

5. Edeh U.E. Dynamic TRM Estimation with Load–Wind Uncertainty Using Rolling Window Statistical Analysis for Improved ATC / U.E. Edeh, T.T. Lie, M.A. Mahmud // *Energies*. – 2026. – Vol.19, Iss. 3. – 844. <https://doi.org/10.3390/en19030844>.

**Секція 4**  
**Енергозбереження та**  
**автоматизація енергетичних**  
**процесів**

УДК 621.311

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ СТАНУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Розен П.В., д.т.н., проф. Розен В.П.

*Інститут загальної енергетики Національної академії наук України, м. Київ*  
p.v.rozen@gmail.com

Науковий керівник: д.т.н., чл.-кор. НАН України Новосельцев О.В.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується широким впровадженням енерго- і ресурсозберігаючих технологій в промислове виробництво, пошуком нових форм та засобів підвищення рівня енергетичної ефективності діяльності його провідних галузей: машинобудування, енергетики, мікроелектроніки, чорної та кольорової металургії, хімічної, електро- і світлотехнічної, харчової промисловості [1, 2, 3].

Під час вирішення проблеми підвищення рівня енергоефективності постають наступні питання: наскільки підприємство ефективно працює у цьому напрямку, яке місце воно посідає за рівнем енергоефективності серед інших підприємств, де підприємство знаходиться на відрізку "успішне" - "неуспішне" за рівнем енергоефективності.

Одним з напрямів вирішення цієї проблеми може слугувати діагностичний енергоаудит [4]. Діагностування стану підприємства з енергоефективності - це процедура визначення рівня енергетичної ефективності виробничої системи за допомогою єдиного та незмінного математичного апарату та визначеними показниками.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є підвищення рівня енергетичної ефективності промислових підприємств шляхом розроблення методу проведення діагностичного енергоаудиту, що дозволить швидко та дешево визначати стан підприємства за рівнем енергоефективності та необхідність у проведенні енергетично аудиту.

Основним завданням розроблення методу проведення діагностичного енергоаудиту є розроблення математичного забезпечення, що дозволяє здійснити аналізування стану підприємства з енергоефективності за показниками.

Об'єктом дослідження є показники ефективного споживання енергоресурсів для визначення рівня стану підприємства з енергоефективності.

**Матеріали і результати дослідження.** Задача діагностування станів підприємства за рівнем енергоефективності є типовою задачею двоальтернативного прийняття рішень з ризиком та може бути вирішена в рамках теорії розпізнавання образів [5, 6].

Задача розпізнавання образів для оцінювання стану енергоефективності промислового підприємства містить три етапи:

1. Формування простору показників, які оцінюють рівень енергетичної ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів;

2. Навчання системи розпізнавання – створення узагальнених класів успішних  $S_2$  та неуспішних  $S_1$  промислових підприємств за рівнем енергоефективності для зняття невизначеності за допомогою навчаючих спостережень;
3. Прийняття рішень – віднесення підприємства до класу найгірших  $S_2$  або найкращих  $S_1$  підприємств за рівнем енергоефективності.

Навчання системи розпізнавання. Метою навчання є поповнення нестачі апріорних знань:

$$X_{m_1}^{(1)} = \begin{pmatrix} x_{11}^{(1)} & x_{12}^{(1)} & \dots & x_{1m_1}^{(1)} \\ x_{21}^{(1)} & x_{22}^{(1)} & \dots & x_{2m_1}^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1}^{(1)} & x_{p2}^{(1)} & \dots & x_{pm_1}^{(1)} \end{pmatrix}, X_{m_2}^{(2)} = \begin{pmatrix} x_{11}^{(2)} & x_{12}^{(2)} & \dots & x_{1m_2}^{(2)} \\ x_{21}^{(2)} & x_{22}^{(2)} & \dots & x_{2m_2}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1}^{(2)} & x_{p2}^{(2)} & \dots & x_{pm_2}^{(2)} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $m_i$  – кількість навчаючих спостережень.

На першому етапі навчання за наведеними характеристиками обчислимо вектори середніх:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} x_i^{(1)} = \begin{pmatrix} x_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} \\ x_3^{(1)} \\ x_4^{(1)} \\ x_5^{(1)} \\ x_6^{(1)} \end{pmatrix}, \hat{a}_2 = \frac{1}{m_2} \sum_{i=1}^{m_2} x_i^{(2)} = \begin{pmatrix} x_1^{(2)} \\ x_2^{(2)} \\ x_3^{(2)} \\ x_4^{(2)} \\ x_5^{(2)} \\ x_6^{(2)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

де  $m_1$  та  $m_2$  – кількість підприємств в успішному та неуспішному стані відповідно.

Використовуючи наступну формулу:

$$m_{jl}^{(1)} = \sum_{i=1}^{m_1} (x_{il}^{(1)} - x_l^{(1)})(x_{il}^{(1)} - x_l^{(1)}) \quad (3)$$

складаємо коваріаційні матриці успішних та неуспішних підприємств:

$$\hat{M}_1 = \begin{pmatrix} x_{11}^{(1)} & x_{12}^{(1)} & x_{13}^{(1)} & x_{14}^{(1)} & x_{15}^{(1)} & x_{16}^{(1)} \\ x_{21}^{(1)} & x_{22}^{(1)} & x_{23}^{(1)} & x_{24}^{(1)} & x_{25}^{(1)} & x_{26}^{(1)} \\ x_{31}^{(1)} & x_{32}^{(1)} & x_{33}^{(1)} & x_{34}^{(1)} & x_{35}^{(1)} & x_{36}^{(1)} \\ x_{41}^{(1)} & x_{42}^{(1)} & x_{43}^{(1)} & x_{44}^{(1)} & x_{45}^{(1)} & x_{46}^{(1)} \\ x_{51}^{(1)} & x_{52}^{(1)} & x_{53}^{(1)} & x_{54}^{(1)} & x_{55}^{(1)} & x_{56}^{(1)} \\ x_{61}^{(1)} & x_{62}^{(1)} & x_{63}^{(1)} & x_{64}^{(1)} & x_{65}^{(1)} & x_{66}^{(1)} \end{pmatrix}, \hat{M}_2 = \begin{pmatrix} x_{11}^{(2)} & x_{12}^{(2)} & x_{13}^{(2)} & x_{14}^{(2)} & x_{15}^{(2)} & x_{16}^{(2)} \\ x_{21}^{(2)} & x_{22}^{(2)} & x_{23}^{(2)} & x_{24}^{(2)} & x_{25}^{(2)} & x_{26}^{(2)} \\ x_{31}^{(2)} & x_{32}^{(2)} & x_{33}^{(2)} & x_{34}^{(2)} & x_{35}^{(2)} & x_{36}^{(2)} \\ x_{41}^{(2)} & x_{42}^{(2)} & x_{43}^{(2)} & x_{44}^{(2)} & x_{45}^{(2)} & x_{46}^{(2)} \\ x_{51}^{(2)} & x_{52}^{(2)} & x_{53}^{(2)} & x_{54}^{(2)} & x_{55}^{(2)} & x_{56}^{(2)} \\ x_{61}^{(2)} & x_{62}^{(2)} & x_{63}^{(2)} & x_{64}^{(2)} & x_{65}^{(2)} & x_{66}^{(2)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Оцінку загальної коваріаційної матриці здійснюємо за формулою:

$$\hat{M} = \frac{1}{m_1+m_2-2} (m_1 \hat{M}_1 + m_2 \hat{M}_2). \quad (5)$$

На наступному кроці розраховуємо зворотню коваріаційну матрицю:

$$\hat{M}^{-1} = \frac{1}{|\hat{M}|} \begin{pmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} & m_{41} & m_{51} & m_{61} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} & m_{42} & m_{52} & m_{62} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & m_{43} & m_{53} & m_{63} \\ m_{14} & m_{24} & m_{34} & m_{44} & m_{54} & m_{64} \\ m_{15} & m_{25} & m_{35} & m_{45} & m_{55} & m_{65} \\ m_{16} & m_{26} & m_{36} & m_{46} & m_{56} & m_{66} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

На другому етапі здійснюється співставлення некласифікованих

спостережень за об'єктом, що досліджується (підприємством) з еталонними описами з визначенням класу до якого належить сукупність спостережень, що досліджується, а з нею і сам об'єкт.

Для прийняття рішень обчислимо оцінку логарифму відношення правдоподібності  $\ln \hat{L}$  за формулою:

$$\ln \hat{L} = \frac{1}{2}(\hat{a}_1 - \hat{a}_2)^T \hat{M}^{-1} [2\bar{x} - (\hat{a}_1 + \hat{a}_2)]. \quad (7)$$

Рішення обирається шляхом порівняння значення  $\ln \hat{L}$  із пороговим значенням  $\ln C$  який, як правило, обирається рівним  $\ln C = 0$ . Тобто, якщо виконується  $\ln \hat{L} > 0$ , то підприємство є успішним, як що ж  $\ln \hat{L} < 0$ , то досліджуване підприємство є неуспішним.

На другому етапі проводиться оцінка достовірності діагностики. Для цього розраховуємо помилки розпізнавання першого та другого роду  $\alpha$  та  $\beta$  за формулою:

$$\alpha = \beta = F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right) F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) + F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right) F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) + \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_1 \sigma_2}{d(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}\right] \left[\sigma_2 \exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma_1^2}\right\}\right] \left[F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right)\right] - \left(\sigma_1 \exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma_2^2}\right\}\right) \left[F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right) F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right)\right]. \quad (8)$$

Для цього попередньо розраховуємо її складові:

$$\text{Відстань Махаланобіса } d^2 = (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)^T \hat{M}^{-1} (\hat{a}_1 - \hat{a}_2). \quad (9)$$

Значення  $\sigma_1^2$  і  $\sigma_2^2$  та  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  розраховуються відповідно до формул:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}, \quad \sigma_1 = \sqrt{\sigma_1^2}; \quad \sigma_2^2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{4}{n}, \quad \sigma_2 = \sqrt{\sigma_2^2}. \quad (10)$$

Розрахуємо значення інтегралу Лапласа:

$$F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right); F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right) = 1 - F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right); F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right); F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) = 1 - F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right). \quad (11)$$

Розрахуємо значення експонент  $\exp\{-Z\}$ :

$$\exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma_1^2}\right\}; \exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma_2^2}\right\}. \quad (12)$$

Підставивши ці значення у формулу (8), розраховуємо вірогідності помилок діагностики  $\alpha = \beta$ . Вірогідність рішення визначається а формулою:

$$D = 1 - \alpha = 1 - \beta. \quad (13)$$

**Модельні розрахунки.** Для діагностування стану підприємства було обрано наступні показники та визначено їм оцінку за чотирибальною системою 0, 1, 2, 3, де 0 – найгірший стан, 3 -найкращій стан (табл. 1).

Таблиця 1

**Формування масиву вихідних даних стану енергоефективності**

Показники	Успішні підприємства $S_1$						Неуспішні підприємства $S_2$						Підпр-во $\bar{X}$
	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$	$X_4^{(1)}$	$X_5^{(1)}$	$X_6^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	$X_2^{(2)}$	$X_3^{(2)}$	$X_4^{(2)}$	$X_5^{(2)}$	$X_6^{(2)}$	
1. Повнота паспортизації обладнання	3	2	3	2	3	2	2	1	2	3	2	2	2
2. Дотримання графіків сервісного обслуговування обладнання	3	3	3	3	3	3	2	1	1	2	1	3	0
3. Наявність служби енергоменеджменту	3	3	2	2	2	3	1	0	1	2	1	2	1
4. Система навчання в області енергозбереження	3	2	0	2	2	2	0	1	0	1	0	1	1
5. Система заохочень за результати в галузі енергозбереження	3	2	1	1	2	1	1	0	1	0	1	0	2
6. Програма енергозбереження	3	3	2	2	2	3	0	1	1	1	2	1	3

Після проведення розрахунків на етапі навчання, за формулою (7) приймаємо рішення, що обране підприємство є неуспішним.

$$\ln \hat{L} = \frac{1}{2}(\hat{a}_1 - \hat{a}_2)^T \hat{M}^{-1} [2\bar{x} - (\hat{a}_1 + \hat{a}_2)] = -21,146 < 0.$$

За формулою (8) проводимо оцінку достовірності діагностики:

$$\alpha = \beta = F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right)F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) + F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right)F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) + \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_1\sigma_2}{d(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}\right] \left[\sigma_2 \exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma_1^2}\right\}\right] \left[F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right)F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right)\right] - \left(\sigma_1 \exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma_2^2}\right\}\right) \left[F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right)F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right)\right] = 0,003.$$

Вірогідність рішення визначимо за формулою (13):

$$D = 1 - \alpha = 1 - \beta = 1 - 0,003 = 0,997.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що досліджувано підприємство є неуспішним  $\ln \hat{L} = -21,146 < 0$  з вірогідністю  $D = 0,997$ .

**Висновки.** В результаті проведення досліджень запропоновано метод діагностики стану енергоефективності промислового підприємства на стадії діагностичного енергоаудиту, що дає змогу здійснити аналізування стану промислового підприємства з енергоефективності за показниками, які встановлюються особою, що приймає рішення.

### Список літератури:

1. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. Схвалено Розпорядженням КМУ № 587-р від 25 червня 2024 р.
2. Ковалко О.М. Вступ до теорії енергоефективності багаторівневих систем: методи та моделі енергетичного менеджменту в системі житлово-комунального господарства / О.М. Ковалко, О.В. Новосельцев, Т.О. Євтухова. – Київ: НАН України, Інститут технічної теплофізики, 2014. – 252 с.
3. Roosa S.A. Energy management handbook / S.A. Roosa, S. Doty, W.C. Turner. – Ninth edition. – Louisville, Kentucky: Fairmont Press, Inc., 2018. – 893 p. ISBN 9788770222655 (electronic)
4. Енергетичний аудит: Навчальний посібник / [О.І. Соловей та ін.]. – Черкаси: ЧДТУ, 2005. – 229 с.
5. Tou J.T. Pattern Recognition Principles / J.T. Tou, R.C. Gonzalez. – Addison-Wesley Publishing Company, 1974. – 377 p. ISBN 0201075865
6. Braga-Neto U. Fundamentals of Pattern Recognition and Machine Learning / U. Braga-Neto. – Springer Nature, 2024. – 292 p. ISBN 3031609514

УДК 621.313:621.314

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ІНВЕРТОРІВ ТА СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І НАДІЙНІСТЬ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЛОКОМОТИВІВ**

К.т.н., доц. Нерубацький В.П., Бувалін М.О., Лісков Д.І.

*Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків*  
nerubatskyi@kart.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Нерубацький В.П.

Сучасний розвиток залізничного транспорту характеризується зростанням вимог до енергоефективності, надійності та екологічності рухомого складу. Особливе місце в цьому процесі займають тягові електроприводи локомотивів, які визначають основні експлуатаційні параметри роботи рухомого складу [1]. Зростання ефективності їх функціонування забезпечує зниження енергоспоживання та експлуатаційних витрат, що є важливим чинником у сучасних економічних умовах. Одним із перспективних напрямів удосконалення тягових систем є впровадження багаторівневих інверторів, які сприяють покращенню якості електричної енергії та зменшенню втрат у силових колах [2–4]. Водночас розвиток сучасних систем керування дозволяє впроваджувати ефективні алгоритми регулювання, що забезпечують підвищення стабільності й надійності роботи електроприводів [5, 6]. Поєднання цих технологій формує передумови для підвищення енергоефективності та надійності тягових електроприводів, що безпосередньо відповідає меті дослідження. Таким чином, дослідження впливу застосування багаторівневих інверторів і сучасних систем керування на енергоефективність та надійність електроприводів локомотивів є актуальним науково-технічним завданням.

Зростання вартості енергоресурсів і необхідність зменшення негативного впливу транспорту на довкілля зумовлюють підвищені вимоги до ефективності використання електричної енергії в тягових системах. Традиційні електроприводи з дво- або трирівневими перетворювачами мають обмеження щодо якості вихідної напруги, що призводить до додаткових енергетичних витрат і прискореного зносу обладнання. Багаторівневі інвертори забезпечують менший рівень гармонічних спотворень, що зменшує електромагнітні втрати, покращує характеристики двигунів і знижує теплове навантаження, подовжуючи строк служби електроприводу [7, 8]. Сучасні системи керування на основі цифрових технологій та адаптивних алгоритмів забезпечують точне регулювання в реальному часі, що сприяє зменшенню витрат і підвищенню ефективності. В умовах модернізації залізничного транспорту в Україні впровадження таких рішень є особливо актуальним, оскільки значна частина рухомого складу потребує оновлення або технічного переоснащення [9]. Отже, дослідження впливу цих технологій є актуальним як у науковому, так і в практичному аспектах. Тягові електроприводи локомотивів функціонують в умовах значно змінних навантажень, що обумовлює необхідність забезпечення високої енергоефективності при збереженні заданого рівня надійності та

ресурсу елементної бази [10, 11]. Ключовим фактором, що визначає енергетичні показники електроприводу, є якість напруги живлення тягових електродвигунів, яка безпосередньо залежить від типу силового перетворювача та системи керування.

Застосування багаторівневих інверторів дозволяє реалізувати ступінчасте наближення вихідної напруги до синусоїдальної форми, що, у свою чергу, призводить до зниження спектральної густини вищих гармонік [4, 12]. Зменшення гармонічних складових струму обумовлює зниження додаткових втрат у сталі та обмотках електродвигуна, а також втрат на перемагнічування та вихрові струми. Відповідно, спостерігається зменшення теплового навантаження, що безпосередньо пов'язано з підвищенням надійності ізоляційних матеріалів та збільшенням міжремонтного ресурсу.

Аналіз енергетичних процесів у силових колах показує, що використання багаторівневих топологій інверторів забезпечує також зниження швидкості зміни напруги, що позитивно впливає на електромагнітну сумісність та зменшує рівень перенапруг у системі. Це є критично важливим для тягових електроприводів, де довжина кабельних ліній та потужність навантаження створюють передумови для виникнення перенапруг і додаткових втрат.

З точки зору силової електроніки, розподіл напруги між кількома напівпровідниковими елементами в багаторівневих інверторах дає змогу зменшити електричні та теплові навантаження на кожен окремий ключ. Це сприяє зниженню інтенсивності процесів старіння напівпровідникових структур та підвищує загальну відмовостійкість системи. Крім того, зростає гнучкість у виборі режимів комутації, що дозволяє оптимізувати співвідношення між втратами на перемикання та втратами провідності.

Суттєвим чинником підвищення ефективності є інтеграція багаторівневих інверторів із сучасними системами керування, що реалізують алгоритми векторного або прямого керування моментом, що визначає енергетичні характеристики системи тягового електроприводу. Використання таких підходів забезпечує розклад струмів на складові, пов'язані зі створенням електромагнітного моменту та магнітного потоку, що створює передумови для оптимізації режимів роботи електродвигуна. У результаті досягається мінімізація втрат у широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів.

Адаптивні та робастні алгоритми керування забезпечують інваріантність системи до зміни параметрів об'єкта керування, зокрема температурних коливань, насичення магнітної системи та зносу елементів [13]. Це дає змогу підтримувати оптимальні режими роботи без необхідності часткої корекції параметрів керування, що особливо важливо для тягового рухомого складу з тривалим періодом експлуатації.

Додатковим резервом підвищення енергоефективності є реалізація рекуперативних режимів гальмування, при яких кінетична енергія рухомого складу перетворюється в електричну та повертається в контактну мережу або використовується внутрішніми споживачами [14, 15]. У поєднанні з багаторівневими інверторами це дозволяє зменшити втрати при перетворенні

енергії та підвищити коефіцієнт використання електроенергії.

Таким чином, системний аналіз показує, що комплексне застосування багаторівневих інверторів і сучасних систем керування забезпечує синергетичний ефект, який проявляється у зниженні енергетичних втрат, підвищенні якості електроенергії та зростанні надійності тягових електроприводів локомотивів.

Проведений аналіз підтверджує ефективність застосування багаторівневих інверторів для підвищення енергетичних характеристик тягових електроприводів локомотивів. Зниження гармонічних спотворень вихідної напруги забезпечує зменшення додаткових втрат у електродвигунах та зниження теплового навантаження, що позитивно впливає на їх надійність. Інтеграція багаторівневих інверторів із сучасними системами керування дозволяє реалізувати енергооптимальні режими роботи в умовах змінних навантажень та забезпечує стійкість до параметричних збурень. Розподіл навантажень між силовими елементами сприяє зниженню ймовірності відмов і підвищенню довговічності обладнання. Отже, комплексне впровадження багаторівневих інверторів і сучасних алгоритмів керування є обґрунтованим напрямом підвищення енергоефективності та надійності тягових електроприводів локомотивів.

#### Список літератури:

1. Nerubatskyi V.P. Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors/ V.P. Nerubatskyi // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2025. – Том 30, № 4. – С. 3–21. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.
2. Ha V.T. Multilevel inverter application for railway traction motor control / V.T. Ha , P.T. Giang, P. Vu // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2022. – Vol. 11, No. 4. – P. 1855-1866. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i4.3964>.
3. Ha V.T. T-type multi-inverter application for traction motor control / V.T. Ha , P.T. Giang, V.H. Phuong // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2022. – Vol. 12, No. 2. – P. 8321-8327. <https://doi.org/10.48084/etasr.4776>.
4. Ha V.T. Sliding mode control of a PMSM railway traction drive fed by multi-level inverter / V.T. Ha, V.Q. Vinh // TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control. – 2023. – Vol. 21, No. 6. – P. 1405-1414. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v21i6.24369>.
5. Panchenko S.V. Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors / S.V. Panchenko, M.M. Babaiev, V.P. Nerubatskyi // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2025. – Вип. 214. – С. 181–200. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>.
6. Mencou S. Advanced control of induction motors (2019–2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques/ S. Mencou, M.B. Yakhlef, E.B. Tazi // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2025. – Vol. 14. – 101098.

<https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101098>.

7. Plakhtii O. Comprehensive study of cascade multilevel inverters with three level cells. / O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, I. Khomenko, V. Tsybulnyk, A. Syniavskyi // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Proceedings. – 2020. – P. 277-282. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160258>.

8. Wang X. Control and modeling of modular multi-level high voltage converter vector for rail trail traction / X. Wang, L. Zhang, P. Wu // International Core Journal of Engineering. – 2021. – Vol. 7, Iss. 5. – P. 299-307. [http://doi.org/10.6919/ICJE.202105\\_7\(5\).0039](http://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7(5).0039).

9. Нерубацький В.П. Моніторинг технічного стану безколекторних тягових двигунів завдяки залученню цифрових технологій сьогодення / В.П. Нерубацький // Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 24–26 листопада 2025 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2025. – С. 81-83.

10. Нерубацький В.П. Ініціювання реалізації прикладного дослідницького проекту з удосконалення енергоефективності тягових електричних двигунів локомотивів з урахуванням режимів функціонування тягових перетворювачів / В.П. Нерубацький // Збірка наукових тез XIV наукової конференції «Наукові підсумки 2025 року» (Харків, 18 грудня 2025 р.). – Харків: ПП «Технологічний Центр», 2025. – С. 29.

11. Нерубацький В.П. Аналіз експлуатаційної надійності безколекторних тягових двигунів локомотивів / В.П. Нерубацький // Тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології засобів транспорту» (Харків, УкрДУЗТ, 03–04 грудня 2025 р.). – Харків: УкрДУЗТ, 2025. – С. 11–13.

12. Нерубацький В.П. Комплексне дослідження роботи каскадного багаторівневого інвертора / В.П. Нерубацький, О.Є. Зінченко, Д.А. Гордієнко // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Стан та перспективи розвитку електричного транспорту» (Харків, 23–25 листопада 2022 р.). – Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2022. – С. 125-127.

13. Нерубацький В.П. Аналіз методів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза/ В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, В.В. Івахно, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2024. – Том 29, № 2. – С. 33–44. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i2.307651>.

14. Varinov I.A. Power IGBTs application in AC-wire DC-motor locomotive thyristor-based power circuit for regenerative brake energy efficiency increase / I.A. Varinov, O.V. Melnichenko // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2019. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742933>.

15. Нерубацький В.П. Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів / В.П. Нерубацький // Збірник матеріалів XI міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2025» (Київ, 18–20 листопада 2025 р.). – Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. – С. 118-119.

УДК 697.133

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ СИСТЕМ

Гуцол О.О., Куляпін Д.В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ

vitusinskasasa@gmail.com, danil221888@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Захарченко А.С.

Сонячний трекер забезпечує автоматичне позиціонування панелей для максимізації генерації енергії [1]. Трекери поділяються на одноосьові та двоосьові, а також активні, пасивні й хронологічні [2].

Рис. 1 детально ілюструє структуру системи автоматичного керування одного з таких активних трекерів, що регулює азимутальний кут повороту сонячної панелі.

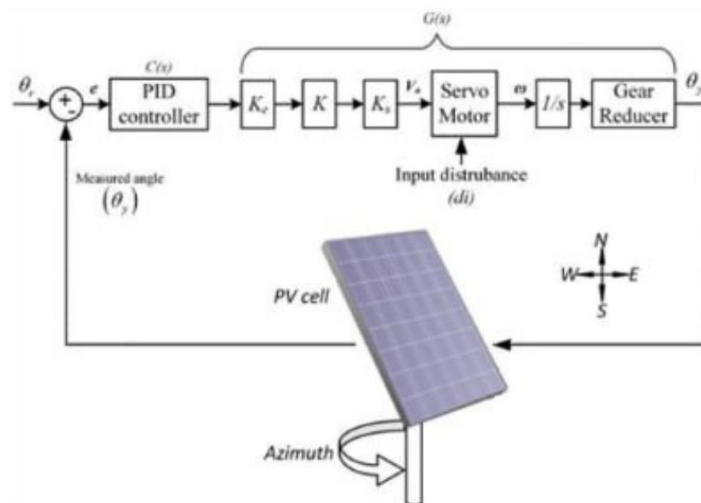


Рисунок 1 – Модель системи керування сонячним трекером із врахуванням вхідних збурень та передавальних функцій елементів привода

Застосування методів теорії автоматичного керування для сонячних трекерів значно підвищує ефективність СЕС (на 25–40 %) шляхом точного позиціонування панелей перпендикулярно до сонячних променів. Використання передавальних функцій, частотних критеріїв стійкості та налаштованих ПД-регуляторів забезпечує плавний, стабільний рух привода з мінімальним енергоспоживанням, оптимізуючи загальний ККД [3].

Для перевірки ефективності використання сонячних трекерів дослідимо кількість та ефективність сонячної енергії, що падає на сонячні панелі протягом дня [3]. Дослідження проводимо для Київської області. Для розрахунку кількості енергії, що потрапляє на панелі, використовуємо формулу (1):

$$E = E_c \cdot \cos(\theta), \quad (1)$$

де  $E_c$  – інсоляція регіону,  $\theta$  – кут між падаючими променями та нормаллю до

поверхні панелі;  $\varepsilon$  – кут сонячного азимута, що утворюється між горизонтальною лінією, спрямованою на південь, і проекцією падіння сонячних променів на горизонтальну площину.

Для визначення необхідних кутів розглянемо геометричний вигляд розташування сонячних панелей у просторі [4].

Для визначення  $\cos(\theta)$  використовуємо формулу (2):

$$\cos(\theta) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\varepsilon - \gamma). \quad (2)$$

Для визначення  $\cos(\varepsilon)$  використовуємо формулу (3):

$$\cos(\varepsilon) = \frac{\sin(\phi) \sin(\alpha) - \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\alpha)}. \quad (3)$$

Кут сонячного схилення  $\delta$  визначається за формулою (4):

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 81)\right), \quad (4)$$

де  $n$  – порядковий номер дня у році;  $\phi$  – це широта місцевості, для якої ведуться розрахунки.

У випадку Київській області  $\phi = 51^\circ$ . Кут  $\omega$  – це кутова міра часу, що еквівалентна  $15^\circ$  на годину. Для її визначення у конкретну годину використовується формула (5):

$$\omega = 15^\circ \cdot (t - 12), \quad (5)$$

де  $t$  – місцева година.

Для реалізації точного позиціонування було створено математичну модель виконавчого механізму. Як відомо, сонячний трекер працює за допомогою датчиків, які визначають положення сонця, і двигунів, які переміщують панелі у відповідь [5].

Математичний опис динаміки цих електромеханічних перетворювачів є критично важливим етапом проектування.

Привід сонячного трекера моделюється двигуном постійного струму.

Після перетворення Лапласа отримано передавальну функцію за кутовою швидкістю:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1}, \quad (6)$$

де  $U(s)$  – керуюча напруга на якорі двигуна;  $\Omega(s)$  – кутова швидкість обертання валу;  $K_m$  – коефіцієнт передачі двигуна;  $T_e$  – електромагнітна стала часу;  $T_m$  – електромеханічна стала часу [3].

Для отримання кута повороту до моделі додається інтегруюча ланка, що дає загальну передавальну функцію об'єкта (7). Таким чином, загальна передавальна функція неперервної частини об'єкта керування (приводу та механічної передачі) за кутом повороту  $\theta$  набуває вигляду:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = W_{\text{дв}}(s) \cdot \frac{1}{s} = \frac{K_m}{s(T_e \cdot T_m \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1)}. \quad (7)$$

Отримана передавальна функція об'єкта керування є базою для подальшого синтезу регулятора [6].

Для аналізу стійкості отриманої електромеханічної системи доцільно застосувати класичні частотні критерії: критерій Михайлова та критерій Найквіста.

Критерій Михайлова дозволяє оцінити стійкість замкненої системи на основі аналізу її характеристичного полінома. Характеристичне рівняння замкненої САК трекера формується з урахуванням передавальних функцій об'єкта керування та регулятора і має вигляд:

$$D(s) = a_n + s^n + a_{n-1} + s^{n-1} + \dots + a_1 + s + a_0 = 0. \quad (8)$$

Підставляючи  $s = jw$ , отримуємо комплексний поліном Михайлова:

$$D(jw) = U(w) + jV(w), \quad (9)$$

де  $U(w)$  – дійсна, а  $V(w)$  – уявна частини.

Стійкість системи оцінюється за критеріями Михайлова та Найквіста [6].

Годограф Найквіста (рис. 2) показує, що система є стійкою, оскільки не охоплює точку  $(-1; j0)$ , із запасами:  $\infty$  дБ за амплітудою та  $68.45^\circ$  за фазою.

Параметри регулятора визначено методом D-розбиття, що забезпечує необхідну стійкість. Сонячний трекер орієнтує панелі під оптимальним кутом до Сонця [7].

Для керування системою використано ПД-регулятор, передавальна функція якого має вигляд:

$$W_{\text{per}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (10)$$

де  $K_p, K_i, K_d$  – відповідно пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти підсилення [8].

Оптимальні параметри регулятора визначено методом D-розбиття, що дозволяє забезпечити необхідні запаси стійкості.

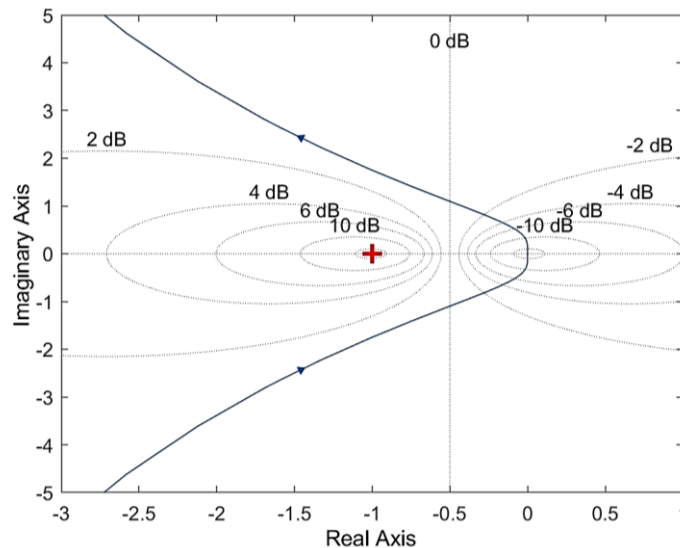


Рисунок 2 – Годограф Найквіста розімкненої системи керування сонячним трекером (побудовано в середовищі MATLAB)

Вибір робочої точки в області стійкості гарантує стабільність системи. Якість керування оцінюється за перехідним процесом при одиничному ступінчастому впливі [9].

Основними показниками є час регулювання, перерегулювання та статична похибка, які мінімізуються під час налаштування ПД-регулятора [3].

**Список літератури:**

1. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – 5th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. – 928 p.
2. Jain S. PID Controller Design for Solar Tracker via Modified Ziegler Nichols Rules / S. Jain, G.N. Pillai, Y.V. Hote // 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). – IEEE, 2020. – P. 531-536.
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія [Чинний від 2011-01-11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.
4. Sigit M.F. PID Controller Simulation on Single Axis Solar Tracking System / M.F. Sigit, Ridwan, S.P. Sari // ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika. – 2023. – Vol. 11, No. 1. – P. 62-74.
5. Синтез та аналіз електромеханічних систем: навч. посіб. / За ред. В.Ф. Шинкаренка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 405 с.
6. Control Systems Analysis of a 3-Axis Photovoltaic Solar Tracker [Electronic resource] // arXiv. – 2025. – Access mode: <https://arxiv.org/> (last access: 26.03.2026). – Title from the screen.
7. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підруч. / С.О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
8. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: підручник / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – Київ: Либідь, 2007. – 544 с.
9. Uebari B. Development of a Hybridized Fuzzy Logic and Transfer Function-Based Model for Intelligent Solar Tracking / B. Uebari, D.O. Dike, L.O. Uzoechi, S.O. Okozi, K.T. Ezirim, I.F. Ezebili // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2025. – Vol. 20, Issue 3. – P. 40-47.

УДК [517.58:536.2]:[691:658.264]

## ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЇ МІТТАГ-ЛЕФФЛЕРА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛАХ

Оробей В.В.

*Харківський національний університет міського господарства*

*імені О.М. Бекетова, м. Харків*

student@example.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Якунін А.В.

Масовані атаки агресора на енергетичні об'єкти України створюють великі ризики щодо безперебійного забезпечення потреб промислових та побутових споживачів. Ключову роль у підвищенні енергоефективності та функціональної стійкості виробничих споруд відіграє точність математичного подання теплових процесів в огорожувальних конструкціях та ізоляційних матеріалах. Класичний закон Фур'є, покладений в основу більшості інженерних розрахунків, передбачає нескінченну швидкість поширення тепла та добре описує теплопровідність однорідних середовищ. Однак у сучасних будівельних матеріалах – пористих, волокнистих, багат шарових або таких, що зазнають термоциклічного навантаження, – процес теплопереносу має аномальний характер [1] і не підпорядковується традиційній моделі – тепло може поширюватися швидше або повільніше, ніж передбачає класична теорія.

Для опису аномальної дифузії тепла застосовують диференціальні рівняння дробового порядку, аналітичні розв'язки яких виражаються через

однопараметричну функцію Міттаг-Леффлера [1, 2]:  $E_{\alpha}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)}$ , де

$k$  – цілий індекс;  $z$  і  $\alpha$  – комплексні числа, причому  $\text{Re } \alpha > 0$ ;  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функція. Ця спеціальна функція комплексного аргументу, що задається

степеневим рядом, слугує узагальненням комплексної експоненти  $e^z$ . Саме вона є «природним» розв'язком дробових рівнянь теплопровідності – так само, як звичайна експонента є розв'язком класичного рівняння. Для більш складних задач призначена двопараметрична функція Міттаг-Леффлера [1, 2]:

$E_{\alpha,\beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)}$ , де  $\beta$  – комплексне число, причому  $\text{Re } \beta > 0$ .

На рис. 1 показано якісну поведінку функції Міттаг-Леффлера  $E_{\alpha}(-t\alpha)$ , де  $t$  – безрозмірний час, що враховує характерний масштаб задачі (наприклад, час теплової релаксації матеріалу), при різних значеннях параметра  $\alpha$ : зменшення  $\alpha$  відповідає зростаючій «пам'яті» матеріалу щодо попередньої теплової дії, а при  $\alpha = 1$  функція перетворюється на звичайну спадаючу експоненту (класичний теплоперенос). Обчислення значень функції Міттаг-Леффлера і побудова її графіка здійсненні у мові програмування Python з використанням бібліотек SciPy та Matplotlib.

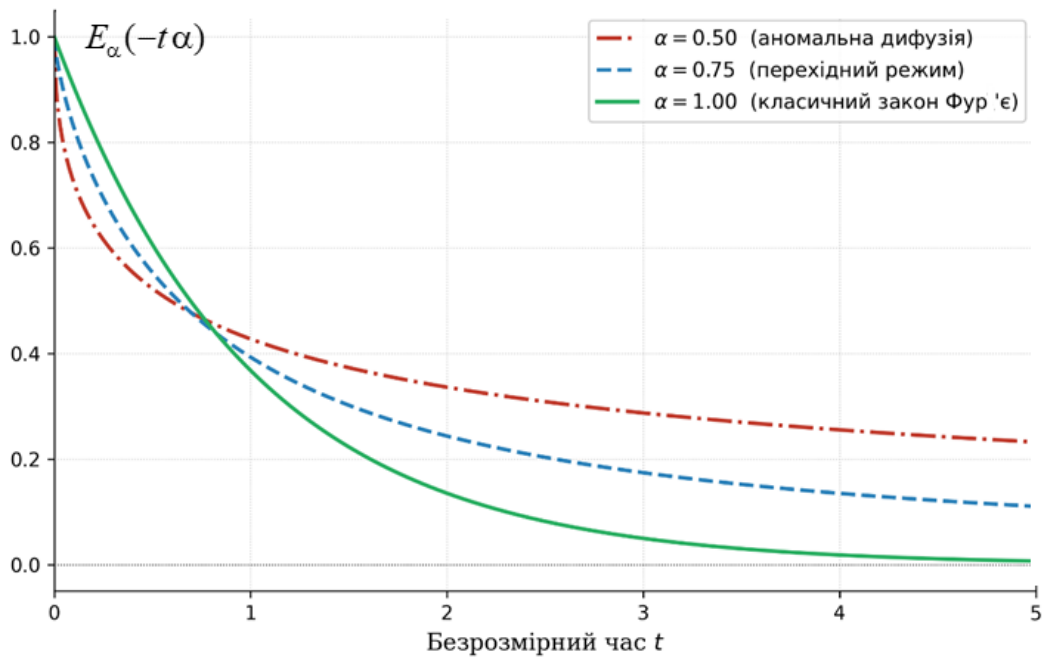


Рисунок 1 – Графіки функції Міттаг-Леффлера  $E_{\alpha}(-t\alpha)$  при різних значеннях параметра  $\alpha$ : порівняння аномального і класичного режимів теплопереносу

Упровадження заходів щодо зростання енергоефективності теплового господарства на базі фрактального підходу передбачає проведення досліджень і створення практичних рекомендацій за кількома напрямками. По-перше, моделювання теплопереносу в пористих тепло- і гідроізоляційних матеріалах (пінобетон, піноскло, мінераловатні плити): дифузія тепла через систему пор і мікроканалів є типово аномальною, і саме дробова модель дозволяє точніше визначити ефективний коефіцієнт теплопровідності [2, 3]. По-друге, аналіз температурних полів у конструкціях з матеріалів, що мають «теплову пам'ять» – тобто таких, теплові характеристики яких залежать від попередньої температурної історії: багаторазово нагріті або охолоджені шари бетону, полімерні тепло- і гідроізоляційні мембрани тощо. По-третє, оцінка довготривалої енергоефективності огорожувальних конструкцій з урахуванням накопичених структурних змін матеріалу під дією температурних циклів та інших зовнішніх впливів.

### Список літератури:

1. Gorenflo R. Mittag-Leffler Functions, Related Topics and Applications / R. Gorenflo, A.A. Kilbas, F. Mainardi, S.V. Rogosin. – Berlin: Springer, 2014. – 357 p.
2. Garrappa R. Numerical evaluation of two and three parameter Mittag-Leffler functions / R. Garrappa // SIAM Journal of Numerical Analysis. – 2015. – Vol. 53(3). – P. 1350–1369.
3. Luo Y. Fractional calculus in rheological modeling of 3D printable concrete: A review / Y. Luo, Y. Zhang // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 411. – 134290. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134290.

УДК 628.9:620.9

## **СВІТЛОДІОДНЕ ОСВІТЛЕННЯ ТА ДАТЧИКИ РУХУ ДЛЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ**

Кебус С.В., Засядьвовк Д.О., д.т.н., проф. Русакова Т.І.  
*Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро*  
kebus@365.dnu.edu.ua

Науковий керівник: д.т.н., проф. Русакова Т.І.

В умовах постійного зростання тарифів на електроенергію, необхідності раціонального використання енергетичних ресурсів та обмеженого фінансування освітніх установ питання підвищення енергоефективності навчальних закладів набуває особливої актуальності. Значна частка споживання електроенергії в університетах, школах і коледжах припадає саме на системи освітлення. За різними оцінками, витрати на освітлення становлять близько 25–40 % загального електроспоживання будівель навчального призначення. У багатьох закладах досі використовуються застарілі люмінесцентні світильники або лампи розжарювання, які характеризуються високим енергоспоживанням, низькою ефективністю та недостатнім ресурсом роботи. Крім того, через відсутність автоматизованого керування освітлення нерідко залишається увімкненим навіть за відсутності людей у приміщеннях [1].

Одним із найбільш доступних і ефективних напрямів скорочення енергоспоживання є модернізація систем освітлення шляхом заміни традиційних джерел світла на світлодіодні (LED) лампи. Світлодіодні технології сьогодні широко застосовуються завдяки високій світловій віддачі, низькому енергоспоживанню та тривалому терміну експлуатації. Сучасні LED-лампи споживають у 3–5 разів менше електроенергії порівняно з лампами розжарювання та значно перевищують люмінесцентні аналоги за показниками енергоефективності. Термін їх служби може досягати 50 000 годин, що суттєво знижує витрати на обслуговування та заміну освітлювального обладнання. Важливою перевагою LED-освітлення є також низький рівень тепловиділення, що дозволяє зменшити додаткове навантаження на системи кондиціонування у теплий період року [1].

Додаткового ефекту енергозбереження можна досягти шляхом інтеграції світлодіодного освітлення з автоматизованими системами керування, зокрема датчиками руху або присутності. Принцип роботи таких систем полягає в автоматичному ввімкненні освітлення за наявності людей у приміщенні та його вимкненні через певний час після припинення руху. Найбільш доцільним є встановлення датчиків у коридорах, санітарних вузлах, сходових клітинах, підсобних приміщеннях, бібліотеках та аудиторіях із нерегулярним режимом використання. Практичний досвід експлуатації показує, що використання датчиків руху забезпечує додаткову економію електроенергії на рівні 30–60 % залежно від типу приміщення та інтенсивності його використання [2].

Комплексне впровадження LED-освітлення разом із системами

автоматичного керування дозволяє суттєво підвищити загальну енергоефективність будівель навчальних закладів. За результатами досліджень, сумарна економія електроенергії при модернізації систем освітлення може досягати 70–80 %, а в окремих випадках – понад 80 % порівняно з традиційними системами освітлення [3]. Особливо актуальним це є в умовах сучасних енергетичних викликів та необхідності зниження навантаження на електромережі.

Окрім безпосереднього економічного ефекту, впровадження світлодіодних технологій і датчиків руху має низку додаткових переваг. Зокрема, підвищується якість освітлення приміщень завдяки кращій кольоровій передачі та відсутності мерехтіння, що позитивно впливає на комфорт і працездатність учасників освітнього процесу. Зменшується кількість технічного обслуговування та витрат на заміну ламп, а також скорочуються непрямі екологічні наслідки, пов'язані зі споживанням електроенергії. Використання LED-ламп також є більш екологічно безпечним, оскільки вони не містять ртуті та інших небезпечних речовин, характерних для люмінесцентних джерел світла.

Для ефективного впровадження енергоощадних технологій у навчальних закладах доцільно попередньо провести енергетичний аудит систем освітлення. Під час такого аудиту визначають кількість і потужність наявних світильників, режим їх експлуатації, рівень природного освітлення та інтенсивність використання приміщень. На основі отриманих результатів можна обґрунтувати вибір типу LED-обладнання, розрахувати потенційну економію електроенергії та визначити оптимальні параметри роботи датчиків руху. Як правило, рекомендований час затримки вимкнення освітлення становить 5–15 хвилин залежно від функціонального призначення приміщення.

Водночас впровадження сучасних систем освітлення потребує певних початкових інвестицій, пов'язаних із закупівлею обладнання, монтажем та налаштуванням систем автоматизації. Також важливим є проведення інструктажу персоналу щодо особливостей експлуатації нових технологій. Проте, незважаючи на початкові витрати, термін окупності таких заходів у більшості випадків становить лише 1,5–3 роки, після чого навчальний заклад отримує стабільну економію коштів на оплату електроенергії.

Для оцінки ефективності впровадження LED-обладнання було проведено спрощений розрахунок на основі типового навчального корпусу №13 Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Вихідні дані: 3 поверхи, по 15 аудиторій на поверх. Разом: 45 аудиторій, підвал-укриття, коридори та санвузли. Орієнтовна кількість люмінесцентних ламп у навчальному корпусі становить 850–950 одиниць.

Люмінесцентні лампи 2×36 Вт зазвичай замінюють LED-трубками 18 Вт або LED-панелями 36 Вт 600×600 мм. Для університету більш сучасний варіант – LED-панелі. Тоді потрібно  $\approx$  450 LED-панелей. Датчики руху доцільно ставити не в усіх аудиторіях, а у коридорах 15–20 шт., санвузлах 10–12 шт., сходових клітинах 6–8 шт., підвалі 8–10 шт. Разом 40 датчиків руху.

Орієнтовна середня ринкова вартість LED-панелі – 450–650 грн за панель, наприклад, LED-панель 600 мм на 600 мм, потужністю 36 Вт, серія ECO –

500 грн, тоді 450 панелей по 500 грн становитиме 225 000 грн.

Середня вартість датчика руху – 350–550 грн, наприклад, датчик Videx VL-SPW02B, тоді вартість 40 датчиків по 400 грн складатиме 16 000 грн.

Монтаж LED-панелі – 150 грн/шт, монтаж датчика руху – 250 грн/шт, вартість монтажу усіх панелей та датчиків руху складе 77 500 грн.

Загальна вартість проекту може становити:  $225\,000 + 16\,000 + 77\,500 \approx 318\,500$  грн. Економія електроенергії з LED-панелями становить 50%, а з датчиками руху – 60–70%, що відповідає результатам сучасних досліджень модернізації освітлення навчальних будівель.

Економія електроенергії  $\approx 120\text{--}160$  тис. грн/рік, що обумовлює термін окупності  $318\,500 / 140\,000 \approx 2.3$  роки.

За розрахунками, у навчальному корпусі №13 Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара може експлуатуватися близько 900 люмінесцентних ламп. Їх заміна на сучасні LED-панелі та встановлення приблизно 40 датчиків руху в коридорах, санітарних вузлах і підвальних приміщеннях потребуватиме інвестицій на рівні 300–350 тис. грн. При цьому очікувана економія електроенергії може становити 60–70 %, а термін окупності заходів – близько 2–3 років.

Таблиця 1

### Порівняння систем освітлення

Показник	Існуюча система	LED + датчики руху
Кількість ламп/панелей	900 люмінесцентних ламп	450 LED-панелей
Потужність однієї лампи	36 Вт	36 Вт
Загальна потужність	32,4 кВт	16,2 кВт
Додаткова економія від датчиків	–	10–20 %
Орієнтовна економія електроенергії	–	60–70 %
Орієнтовна вартість модернізації	–	320 тис. грн
Термін окупності	–	2–3 роки

Таким чином, застосування світлодіодних ламп і датчиків руху є одним із найбільш ефективних, доступних та економічно обґрунтованих напрямів енергозбереження в освітніх закладах України. Комплексна модернізація систем освітлення дозволяє не лише скоротити витрати електроенергії, а й підвищити комфортність навчального середовища, зменшити навантаження на енергосистему та сприяти реалізації принципів сталого розвитку й екологічної безпеки.

### Список літератури:

1. Amasyali K. Energy saving of a university building using a motion detection sensor and room management system / K. Amasyali, N. El-Gohary, T. El Diraby // Sustainability. – 2020. – No.12(22). – 9471.
2. William A. Potential energy savings from high-resolution sensor controls for LED lighting / A. William, B. Atkinson, K. Garbesi, F. Rubinstein, E. Page // Energy and Buildings. – 2018. – No.158. – P. 43-53.
3. Bellia L. Energy and reliability optimization of a system that combines daylighting and artificial sources: A case study carried out in academic buildings / L. Bellia, F. Fragliasso, E. Stefanizzi // Applied Energy. – 2016. – No.169. – P. 250-266.

УДК 621.315.54

## ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ УСТАНОВОК

Дмитренко Є.В.<sup>1</sup>, Скрипка О.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державний біотехнологічний університет, м. Харків

<sup>2</sup>Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя

hnaghv@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Гузенко В.В.

Відомо, що відхилення напруги від номінального значення завжди призводить до збитків, які мають технологічну і електромагнітну складову. Електромагнітна складова визначається втратою активної потужності і зміною терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова збитків обумовлена впливом відхилення напруги на продуктивність технологічних установок та собівартість продукції, що випускається [1].

На сьогоднішній день відхилення напруги в електромережах України складає близько 15–28 % від номінального, що значно перевищує допустиме значення [1]. Як показують дослідження, у зв'язку з відхиленням напруги змінюються і енергетичні характеристики робочих машин.

Як показує аналіз останніх досліджень і публікацій, на сьогоднішній день вже отримані аналітичні залежності моменту асинхронного електродвигуна від напруги та втрат енергії у всіх усталених режимах роботи при номінальних параметрах живильної мережі [2]. Встановлені залежності продуктивності, тиску, моменту статичних опорів та потужності відцентрових вентиляторів від кутової швидкості [3]. При цьому не проводилися дослідження з впливу відхилення напруги на енергетичні характеристики вентиляційних установок.

Мета дослідження – встановлення впливу відхилення напруги на енергетичні характеристики вентиляційних установок.

Детальний аналіз зміни кутової швидкості електропривода при відхиленні напруги проведений з використанням існуючих положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, приводних характеристик вентиляторів та застосуванням математичного моделювання. При експериментальних дослідженнях впливу відхилення напруги на енергетичні характеристики вентиляційних установок напругу на двигуні змінювали за допомогою автотрансформаторів, вимірюючи при цьому частоту обертання валу тахометром.

Результати досліджень та їх обговорення проводились на кафедрі електромеханіки та робототехніки. Механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці при відхиленні напруги описується залежністю [4]:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} U_*^2 (\omega_{\delta} - \omega), \quad (1)$$

де  $M_\delta$  – момент двигуна, Н·м;  $\beta_\delta$  – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с;  $\omega_0$  – синхронна кутова швидкість, с<sup>-1</sup>;  $\omega$  – задана кутова швидкість, с<sup>-1</sup>;  $U^*=U/U_H$  – напруга у відносних одиницях.

Механічна характеристика вентиляторів має вигляд [3]:

$$M_c = M_0 + (M_{с.н.} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2, \quad (2)$$

де  $M_c$  – момент статичних опорів вентилятора, Н·м, при заданій кутовій швидкості;  $M_0$  – початковий момент, Н·м;  $M_{с.н.}$  – момент статичних опорів, Н·м, при номінальній кутовій швидкості;  $\omega$  і  $\omega_H$  – задане і номінальне значення кутової швидкості, с<sup>-1</sup>.

Тоді в усталеному режимі роботи:

$$\beta_\delta U_*^2 (\omega_0 - \omega_H \omega_*) = M_0 + (M_{с.н.} - M_0) \omega_*^2, \quad (3)$$

де  $\omega_* = \omega/\omega_H$  – кутова швидкість у відносних одиницях.

Експериментальні дослідження зміни продуктивності і потужності відцентрових вентиляторів ВЦ4-75-2,5 та ЗАВ 446 при відхиленні напруги (рис. 1) підтвердили адекватність залежностей:

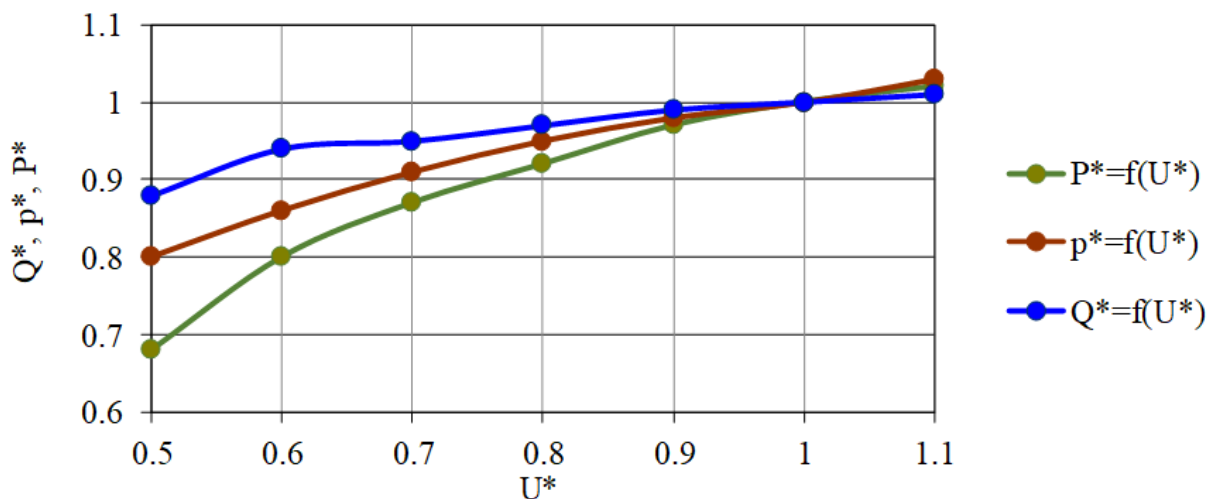


Рисунок 1 – Залежності продуктивності (Q), тиску (p) і потужності (P) відцентрових вентиляторів від напруги у відносних одиницях.

Відомо, що продуктивність вентилятора прямо пропорційна кутовій швидкості, тому закон її зміни при відхиленні напруги був врахований. А потужність вентилятора завжди прямо пропорційна кубу кутової швидкості [4].

Із (3) отримаємо:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2}{\beta_\delta (\omega_0 - \omega_H \omega_*)}}. \quad (4)$$

Із залежності (4) випливає, що зниження напруги, яка подається на електричний двигун викликає зростання питомої витрати електроенергії у вентиляційних установках, а її підвищення – невелике зниження (рис. 2).

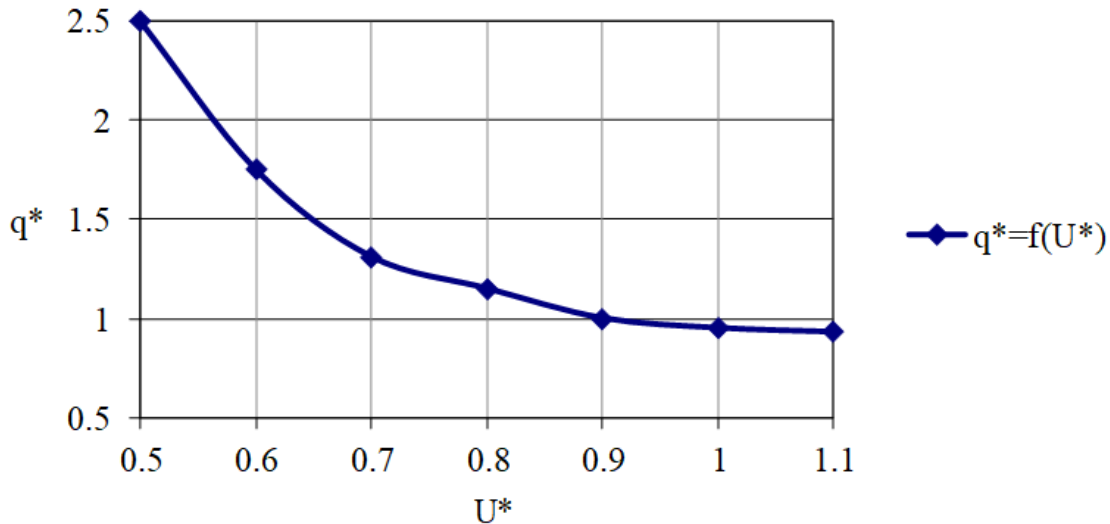


Рисунок 2 – Залежність питомої витрати електроенергії вентиляційних установок від напруги

Висновки. Було доведено, що при відхиленні напруги продуктивність і потужність вентиляторів змінюються за складними алгоритмами. При зниженні напруги на 20 % їх продуктивність зменшується до 4 %, потужність – до 8 %, а питома витрата електроенергії збільшується на 15 %.

#### Список літератури:

1. Клепиков В.Б. Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям: монографія / В.Б. Клепиков – Харків: Видавництво “Підручник НТУ ХП”; 2014. – 408 с.
2. Корчемний М.О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М.О. Корчемний, В.С. Федорейко, В.П. Щербань – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 90 с.
3. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. / М.Л. Лисиченко [та ін.]. – Харків: ХНТУСГ: Факт, 2012. – 500 с.
4. Іскерський І. Енергоефективне керування електроприводом технологічних установок / І. Іскерський, В. Федорейко, М. Рутило, І. Луцик // Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: IV Міжнар. науково-техн. конф., 24–26 квіт. 2012 р.: матеріали доп. – Тернопіль, 2012. – С. 121-123.

УДК 517.982.4:621.311

## ДЕЛЬТА-ФУНКЦІЯ ДІРАКА В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ: SMART GRIDS, SMART MONITORING, SMART HOME/CITY

Гетманова Л.С.

*Харківський національний університет міського господарства*

*імені О.М. Бекетова, м. Харків*

Lidiiia.Hetmanova@kname.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Якунін А.В.

В умовах переходу до інтелектуальної енергетики та цифровізації міської інфраструктури (Smart Grids, Smart Home/City) дельта-функція Дірака слугує математичним підґрунтям для розробки систем автоматичного керування, моніторингу та оптимізації інфраструктурних процесів. Такі адаптивні системи дозволяють динамічно керувати виробництвом і розподілом електроенергії, прогнозувати попит та оптимізувати споживання у режимі реального часу.

Одинична імпульсна дельта-функція Дірака  $\delta(t)$  [1] визначається як узагальнена функція – неперервний лінійний функціонал у просторі числових нескінченно диференційованих фінітних функцій (основних функцій). Важливу роль відіграє її фільтруюча властивість:  $\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-t_0)dt = f(t_0)$ , яку можна розглядати як ідеальну функцію вибірки, що миттєво зчитує стан системи  $f(t)$  у конкретний момент  $t_0$  часу  $t$ . В електротехніці процес оцифрування аналогових сигналів – зокрема, неперервного зчитування показань напруги, сили струму та потужності з розумних лічильників (Smart Meters) – базується на моделі «гребінця Дірака» (послідовності  $\delta$ -функцій) [1, 2]. Це забезпечує точне перенесення фізичних вимірів у цифрові дані для систем Smart Monitoring без втрати інформативності, що дозволяє коректно застосовувати перетворення Фур'є та  $z$ -перетворення.

В автоматизації енергетичних процесів і керуванні режимами Smart Grids  $\delta$ -функція є ключовою для математичного моделювання швидкоплинних перехідних процесів та стрибкоподібних аварійних режимів [3]. Сучасні енергосистеми вимагають миттєвої реакції на технологічні збурення і загрози, викликані як природними факторами, так і людськими діями, зокрема військовими ударами, для підтримки стабільності частоти та напруги в реальному часі. Тому раптові короткочасні збурення в енергомережі, такі як різкі зміни навантаження, комутаційні перенапруги, ударні струми короткого замикання або грозові розряди доцільно моделювати саме як дельта-імпульси. Оскільки тривалість цих явищ є мізерно малою порівняно з усталеними процесами в мережі, а амплітуда – екстремально високою, апроксимація через  $\delta$ -функцію дозволяє суттєво спростити диференціальні рівняння стану системи і в рамках операційного числення перейти до розгляду алгебраїчних рівнянь, що полегшує моделювання та автоматизацію керування розумними мережами.

При цьому замість апаратного та обчислювально затратного безперервного інтегрування складних коливань, сучасні мікропроцесорні системи релейного захисту та протиаварійної автоматики застосовують аналіз короткого приросту імпульсу [2], що допомагає виявити дефекти в ізоляції трансформаторів або пошкодження в кабельних лініях. Це забезпечує надшвидку ідентифікацію пошкодженої ділянки та її локалізацію ще до того, як аварія набуде каскадного характеру. У такому аналітичному підході дельта-функція Дірака виступає ідеалізованою початковою умовою для знаходження функції Гріна (імпульсної перехідної характеристики), що слугує базою подальшого використання згортки функцій при розрахунку реакції на будь-який довільний сигнал. Це відтворює точну картину поширення хвилі електромагнітного збурення по розгалуженій мережі з бігом часу, що є математичною основою для новітніх алгоритмів самовідновлення (Self-Healing) у розумних електромережах [3].

Сучасний підхід до прогнозування енергоспоживання, балансування генерації з розподілених і відновлюваних джерел, керування навантаженнями в інфраструктурі Smart City передбачає активне застосування технологій на базі штучного інтелекту. В архітектурі глибоких згорткових нейронних мереж, що аналізують терабайти зашумлених телеметричних даних з енергосистем, використовується метод ініціалізації Дірака (Dirac Initialization) [4]. Він перетворює кожен шар мережі на початковому етапі навчання на тотожне відображення, що успішно вирішує проблему згасання градієнта. Це суттєво покращує збіжність алгоритмів навчання, забезпечуючи стабільну та швидку роботу предиктивних моделей у режимі реального часу [4].

Дельта-функція Дірака пройшла шлях від абстракції квантової механіки до фундаментального інструменту створення програмного коду сучасних систем енергетичного менеджменту. Її коректне застосування забезпечує високоточне оцифрування та оперативну обробку потоків даних електромереж у реальному часі, швидкісне моделювання реакцій на аварійні імпульси та апаратну стабільність навчання ШІ-моделей, що є запорукою забезпечення надійності, безпеки та ефективності енергетичної Smart-інфраструктури.

### Список літератури:

1. Kanwal R.P. Generalized Functions: Theory and Applications / R.P. Kanwal. – Boston: Birkhauser, 2004. – 476 p.
2. Oppenheim A.V. Signals & systems / A.V. Oppenheim. 2nd ed. – Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 1997. – 957 p.
3. Zaker B. Power System Transients: Modelling Simulation and Applications [Electronic resource] / B. Zaker, A. Yazdani, G.B. Gharehpetian. – Boca Raton: CRC Press, 2023. – 249 p. – Access mode: [https://www.scribd.com/document/986898722/Power-System-Transients-Modelling-Simulation-and-Gevork-Gharehpetian-Atousa-Yazdani-Behrooz-Zaker-Gevork-WeLib-org?language\\_settings\\_changed=English](https://www.scribd.com/document/986898722/Power-System-Transients-Modelling-Simulation-and-Gevork-Gharehpetian-Atousa-Yazdani-Behrooz-Zaker-Gevork-WeLib-org?language_settings_changed=English).
4. Zagoruyko S. DiracNets: Training Very Deep Neural Networks Without Skip-Connections [Electronic resource] / S. Zagoruyko, N. Komodakis. arXiv:1706.00388v2 [cs.CV], 2018. – 8 p. – Access mode: URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.00388>.

УДК 621.577

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ХІМІЧНИХ ДОБРІВ

Федоряка І.М., к.т.н., доц. Клімов Р.О., к.т.н., доц. Крюковська О.А.  
*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське*  
klroma@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Клімов Р.О.

У сучасних умовах при швидкому зростанні цін на енергоносії, особливо актуальною стає проблема енергозбереження у виробничо-господарській діяльності підприємств. Одним з найенергоємніших процесів є теплова сушка [1]. Особливого значення даний технологічний процес набуває в умовах, коли необхідне збереження певних властивостей висушеного матеріалу. Але навіть при високих витратах даного процесу не вдається уникнути низької якості висушеного матеріалу.

Одним із способів, що дозволяє істотно знизити експлуатаційні витрати процесу сушки і отримати високоякісний продукт, є технологія сушки з тепловим насосом [1, 2]. Встановлення теплового насосу за сушаркою на стороні відхідних газів впливає на вологісний і температурний режим, при рециркуляції частки відхідних газів оброблених в тепловому насосі на вхід до сушарки. У звичайній сушарці неможлива повна рециркуляція, так як підвищення вологості газу швидко ліквідує його сушильну здатність, але коефіцієнт корисної дії конвективних сушарок залежить від ступеня рециркуляції. Тому тепловий насос може бути ефективно застосований в сушарках як засіб видалення вологи з відпрацьованого газу, так що він може направлятися на рециркуляцію в значно більших кількостях.

Проведені дослідження сумісної роботи сушарки для сушки  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  разом з тепловим насосом з метою визначення впливу від встановлення теплового насосу в технологічний цикл сушки на теплову економічність роботи сушильної установки. Було використане зведення тепловологічних балансів сушарки методом ітерацій. Використання теплового насосу для підсушування відхідного вологого газу та повернення його в цикл дозволяє підвищити ККД сушарки на 6 %, але при цьому витрачається енергія на привід компресора теплового насосу. В цілому ж ефективність використання сушильного агенту значно зростає.

### Список літератури:

1. Ткаченко С.Й. Сушильні процеси та установки: навч. посіб. / С.Й. Ткаченко, О.Ю. Співак. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 76 с.
2. Арсен'єв В.М. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку : навч. посіб. / В.М. Арсен'єв, С.С. Мелейчук. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с.

УДК 629.5.064.5

## **ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕРМОДАТЧИКІВ НА СУДНОВИХ КОНТЕЙНЕРОВОЗАХ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ**

К.т.н., доц. Селіверстова С.Р., Пасечний Д.І.  
*Херсонська державна морська академія, м. Одеса*  
ussr28031972@gmail.com  
Науковий керівник: к.т.н., доц. Селіверстова С.Р.

Сучасні контейнеровози є складними багатофункціональними транспортними системами, ефективна робота яких значною мірою залежить від надійності автоматизованих систем контролю та моніторингу [1]. Одним із найважливіших елементів таких систем виступають термодатчики, які забезпечують безперервний контроль температурних режимів суднових механізмів, вантажних приміщень, рефрижераторних контейнерів та енергетичних установок.

У зв'язку зі зростанням обсягів контейнерних перевезень та підвищенням вимог до безпеки транспортування вантажів питання надійності температурного контролю набуває особливої актуальності. Несправність або некоректна робота термодатчиків може призводити до значних економічних втрат, аварійних ситуацій, псування вантажу та порушення міжнародних норм експлуатації суден [2]. Особливо важливу роль термодатчики відіграють у системах обслуговування рефрижераторних контейнерів, де навіть незначні відхилення температури можуть спричинити втрату якості продукції або повне псування вантажу. На сучасному етапі розвитку автоматизації морського транспорту проблема достовірності показників температурного контролю є одним із ключових факторів безпечної експлуатації контейнеровозів.

Однією з головних проблем під час експлуатації суднових термодатчиків є вплив агресивного морського середовища. Підвищена вологість, соляний туман, вібрації та постійні температурні коливання негативно впливають на точність та довговічність датчиків. До основних несправностей термодатчиків на контейнеровозах належать [2]:

- корозія контактних елементів;
- механічні пошкодження кабельних ліній;
- порушення герметичності датчиків;
- похибки вимірювання через електромагнітні завади;
- деградація чутливих елементів;
- збої передачі сигналу до центральних систем моніторингу.

Практика експлуатації автоматизованих систем контейнеровозів показує, що значна частина аварійних ситуацій пов'язана саме з невірними показниками температурного контролю [3]. Особливо небезпечними є випадки, коли система не фіксує перегрів суднових механізмів або некоректно відображає температуру в рефрижераторних контейнерах.

Ще однією проблемою є складність своєчасної діагностики несправностей.

На багатьох суднах використовуються застарілі системи контролю, які не забезпечують автоматичного виявлення відмов датчиків. У результаті екіпаж отримує недостовірну інформацію щодо реального стану обладнання.

Важливим фактором також є людський чинник. Неналежне технічне обслуговування, несвоєчасна перевірка калібрування або неправильний монтаж термодатчиків значно знижують ефективність систем контролю температури.

Проаналізуємо особливості роботи термодатчиків у рефрижераторних контейнерах. На сучасних контейнеровозах значну частину вантажу складають рефрижераторні контейнери, призначені для транспортування продуктів харчування, медикаментів та інших температурно чутливих вантажів. Для забезпечення стабільного температурного режиму використовуються електронні термодатчики високої точності. Вони здійснюють постійний контроль температури повітря всередині контейнера та передають інформацію до центральної системи управління судна. Однак, у процесі експлуатації виникають такі проблеми:

- нестабільність живлення рефрижераторних установок;
- пошкодження датчиків під час навантажувально-розвантажувальних робіт;
- помилки передачі даних через мережеві перевантаження;
- вплив зовнішніх кліматичних умов;
- недостатня точність окремих типів датчиків.

У разі виходу з ладу термодатчика екіпаж може не отримати інформацію про критичне підвищення, або зниження температури, що призводить до псування продукції та значних фінансових збитків. Саме тому, питання резервування систем контролю температури є надзвичайно важливим [2,3].

Для підвищення надійності роботи термодатчиків на контейнеровозах доцільно впроваджувати сучасні цифрові системи моніторингу та автоматичної діагностики.

Перспективними напрямками розвитку є:

- використання інтелектуальних датчиків із функцією самодіагностики;
- застосування бездротових систем передачі даних;
- впровадження резервних каналів контролю температури;
- автоматичне калібрування датчиків;
- використання штучного інтелекту для аналізу температурних режимів;
- дистанційний моніторинг технічного стану обладнання.

Сучасні цифрові системи дозволяють своєчасно виявляти відхилення у роботі датчиків та попереджати аварійні ситуації ще до виникнення критичних наслідків. Важливим напрямом є також підвищення якості технічного обслуговування суднових систем [4]. Регулярна перевірка стану контактів, кабельних трас, герметичності та калібрування датчиків значно знижує ризик відмов. Окрему увагу необхідно приділяти підготовці суднового персоналу. Екіпаж повинен володіти сучасними методами діагностики несправностей та вміти оперативно реагувати на відмови систем температурного контролю.

Таким чином, термодатчики є одним із ключових елементів систем безпеки та автоматизації сучасних контейнеровозів. Надійність їх роботи

безпосередньо впливає на безпечну експлуатацію судна, збереження вантажу та ефективність морських перевезень. Основними проблемами експлуатації термодатчиків залишаються вплив агресивного морського середовища, корозія, механічні пошкодження, електромагнітні завади та недостатній рівень технічного обслуговування.

Для вирішення зазначених проблем необхідним є комплексний підхід, який включає модернізацію систем контролю, впровадження цифрових технологій, використання інтелектуальних датчиків та підвищення рівня підготовки суднового персоналу. Подальший розвиток автоматизованих систем температурного контролю сприятиме підвищенню безпеки мореплавства, зменшенню експлуатаційних витрат та покращенню якості контейнерних перевезень у світовому судноплавстві.

### **Список літератури:**

1. International Maritime Organization. Guidelines for the carriage of refrigerated containers by sea. – London: IMO Publishing, 2021. – 134 p.
2. Кацман Ф.М. Суднові автоматизовані системи контролю та діагностики: навч. посіб. / Ф.М. Кацман. – Одеса: Фенікс, 2021. – 248 с.
3. Жиленков А.А. Системи моніторингу рефрижераторних контейнерів на морському транспорті / А.А. Жиленков // Вісник Одеського національного морського університету. – 2022. – № 3(69). – С. 112-118.
4. Бень А.П. Автоматизація судових енергетичних установок: підручник / А.П. Бень, В.І. Соколов. – Миколаїв: НУК, 2020. – 356 с.

УДК 620.92:502.17

## **РОЛЬ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМІ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ**

Чумак С.С., Тельпук Є.В., д.т.н., проф. Русакова Т.І.

*Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро*

chumak\_s@365.dnu.edu.ua

Науковий керівник: д.т.н., проф. Русакова Т.І.

Сучасний розвиток енергетики характеризується постійним зростанням споживання ресурсів, що створює серйозні виклики для довкілля та економіки. Використання традиційних джерел енергії, таких як вугілля, нафта та природний газ, призводить до виснаження природних ресурсів і значних викидів парникових газів. У зв'язку з цим важливого значення набуває впровадження відновлювальних джерел енергії як складової системи ресурсозбереження.

Відновлювальні джерела енергії визначаються як джерела, що здатні відновлюватися природним шляхом. До них належать сонячна, вітрова, гідроенергія, геотермальна енергія та біоенергія. Їх особливістю є практична невичерпність та значно менший негативний вплив на навколишнє середовище порівняно з традиційними енергоресурсами. За даними Міжнародного енергетичного агентства, глобальне зростання потужностей відновлюваної енергетики значно прискорилося завдяки активному впровадженню сонячної та вітрової енергетики, а сонячні фотоелектричні системи забезпечують близько двох третин приросту нових потужностей ВДЕ [1].

Однією з ключових переваг відновлювальних джерел енергії є те, що виробництво електроенергії за допомогою сонячних панелей і вітрових турбін практично не супроводжується значними викидами шкідливих речовин та парникових газів. Це дозволяє суттєво зменшити рівень забруднення атмосфери та сприяє реалізації міжнародних кліматичних цілей.

У сучасній практиці впровадження відновлюваних джерел енергії показовим є приклад США, де державна політика та інвестиції активно стимулюють розвиток «зеленої» енергетики. Зокрема, у країні стрімко зростає встановлена потужність сонячних і вітрових електростанцій, що пов'язано зі зниженням вартості технологій та підтримкою на законодавчому рівні. За даними Управління енергетичної інформації США, використання відновлюваної енергії сприяє зміцненню енергетичної безпеки та скороченню залежності від викопного палива [2].

Крім екологічних аспектів, важливою є економічна ефективність використання відновлюваної енергії. Незважаючи на значні початкові витрати на встановлення обладнання, у довгостроковій перспективі такі технології дозволяють знизити витрати на електроенергію. Це пов'язано зі стрімким здешевленням сонячних панелей, вітрових установок та систем накопичення енергії.

Значну роль відновлювальні джерела енергії відіграють у забезпеченні сталого розвитку. Відповідно до рішень міжнародної кліматичної конференції COP28, понад 130 країн світу підтримали ініціативу щодо потроєння потужностей відновлюваної енергетики до 2030 року [3]. Це свідчить про поступовий перехід світової енергетики до більш екологічно безпечної та ресурсоефективної моделі розвитку.

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), встановлена потужність відновлюваної енергетики у світі постійно зростає [4].

На рис. 1 зображено графік динаміки зростання встановленої потужності відновлюваної енергетики у світі протягом 2015–2025 років. Графік демонструє стабільне збільшення потужностей ВДЕ, що свідчить про активний розвиток сонячної, вітрової та інших видів альтернативної енергетики.

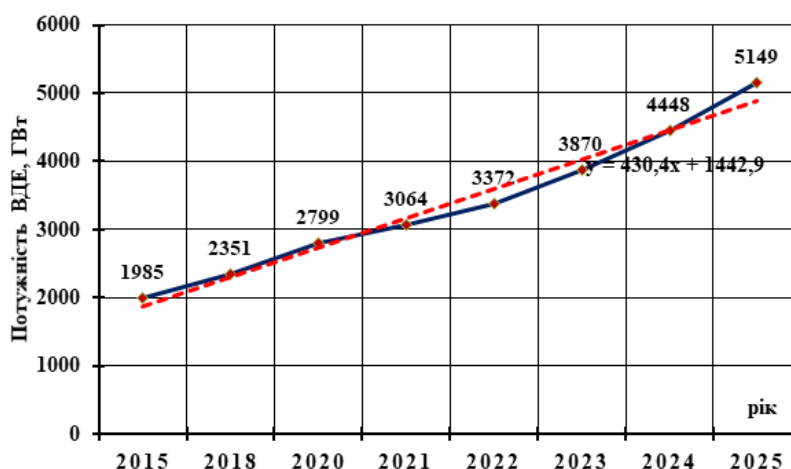


Рисунок 1 – Динаміки зростання встановленої потужності відновлюваної енергетики у світі протягом 2015–2025 років

Аналіз статистичних даних показує, що за досліджуваний період встановлена потужність ВДЕ зростає більш ніж удвічі з 1985 ГВт у 2015 році до понад 5000 ГВт у 2025 році. Найбільш інтенсивне зростання спостерігається після 2020 року, що пов'язано з глобальним енергетичним переходом, розвитком інноваційних технологій та посиленням міжнародної кліматичної політики.

У житловому секторі використання відновлюваних джерел енергії проявляється у встановленні сонячних панелей, теплових насосів та інших енергоефективних систем. Такі рішення дозволяють не лише зменшити споживання традиційної енергії, але й підвищити рівень енергетичної незалежності домогосподарств.

На рис. 2 зображено графік зміни частки відновлюваних джерел енергії у світовому виробництві електроенергії у 2010–2025 роках. Графік відображає поступове збільшення ролі ВДЕ у світовій енергосистемі.

З наведених даних видно, що частка ВДЕ у світовій генерації електроенергії зростає з близько 20 % у 2010 році до приблизно 34 % у 2025 році. Це свідчить про активне впровадження відновлюваних джерел енергії та поступове скорочення залежності від традиційного викопного палива.

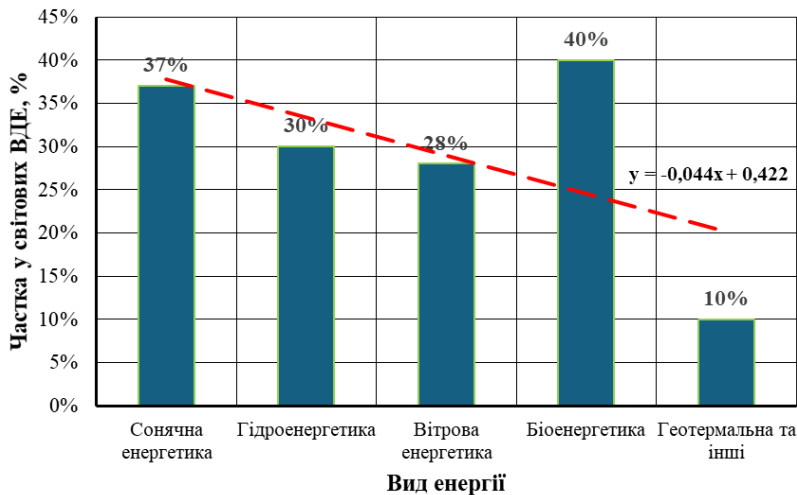


Рисунок 2 – Динаміки зміни частки відновлюваних джерел енергії у світовому виробництві електроенергії у 2010–2025 роках

У промисловості також активно впроваджуються відновлювані технології. Використання біомаси дає змогу перетворювати відходи у корисну енергію, що одночасно сприяє ресурсозбереженню та вирішенню проблеми утилізації відходів.

На рис. 3 зображено графік тенденції розвитку відновлюваної енергетики на основі лінії тренду. Побудована лінія тренду демонструє подальшу перспективу зростання показників ВДЕ у світі.

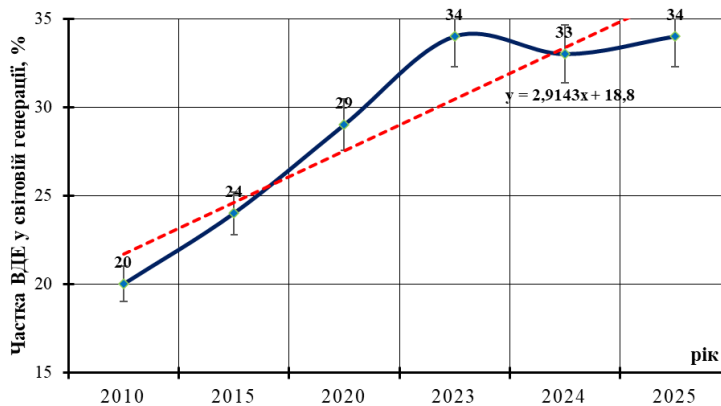


Рисунок 3 – Тенденції розвитку відновлюваної енергетики

Отримані результати підтверджують наявність стійкої тенденції до збільшення обсягів використання відновлюваних джерел енергії. Аналіз динаміки розвитку ВДЕ свідчить про стале зростання як встановленої потужності, так і частки відновлюваних джерел у світовому виробництві електроенергії. У період 2015–2025 рр. загальна потужність ВДЕ у світі зростає більш ніж удвічі з 1985 ГВт до 5149 ГВт. Одночасно частка відновлюваних джерел у світовій генерації електроенергії збільшилася з 24 % у 2015 році до близько 34 % у 2025 році. Це свідчить про активний розвиток сонячної та вітрової енергетики, поступове скорочення залежності від викопного палива та прискорення глобального енергетичного переходу.

Гідроенергетика, у свою чергу, забезпечує стабільне виробництво електроенергії. В Україні також активно розвиваються біоенергетичні технології. Зокрема, компанія МХП впроваджує проекти з виробництва біогазу, біометану та електроенергії з відновлюваних джерел, що є важливим елементом стратегії сталого розвитку підприємства [5].

Разом із тим, існують певні труднощі у використанні відновлюваних джерел енергії. Серед них можна виділити залежність від природних умов, таких як сонячна активність або швидкість вітру, а також необхідність розвитку систем накопичення енергії. Проте сучасні технології поступово дозволяють вирішувати ці проблеми.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна зробити висновок, що відновлювальні джерела енергії відіграють ключову роль у системі ресурсозбереження та забезпеченні сталого розвитку суспільства. Їх використання сприяє скороченню споживання викопного палива, зменшенню викидів парникових газів і зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Проведений аналіз статистичних даних засвідчив стійку тенденцію до зростання потужностей відновлюваної енергетики у світі. Упродовж 2015–2025 років встановлена потужність ВДЕ збільшилася більш ніж удвічі, а частка відновлюваних джерел у світовому виробництві електроенергії суттєво зростає. Це свідчить про активний розвиток сонячної та вітрової енергетики, поступовий перехід до ресурсоефективних технологій та посилення глобальної енергетичної трансформації.

### Список літератури:

1. Panwar N.L. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review / N.L. Panwar, S.C. Kaushik, S. Kothari // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, Is. 3. – P. 1513-1524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>.
2. Halkos G.E. Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources / G.E. Halkos, E.-C. Gkampoura // *Energies*. – 2020. – Vol. 13(11). – P. 2906. <https://doi.org/10.3390/en13112906>.
3. Osman A.I. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review / A.I. Osman et al. // *Environmental Chemistry Letters*. – 2023. – Vol. 21. – P. 741-764. DOI: 10.1007/s10311-022-01532-8.
4. Gasparatos A. Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy / A. Gasparatos, C.N.H. Doll, M. Esteban, A. Ahmed, T.A. Olang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 70. – P. 161-184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>.
5. Tian J. Is renewable energy sustainable? Potential relationships between renewable energy production and the Sustainable Development Goals / J. Tian, S.A. Culley, H.R. Maier et al. // *npj Climate Action*. – 2024. – No. 3. – P. 35. <https://doi.org/10.1038/s44168-024-00120-6>.

## **Секція 5**

# **Економічні та екологічні аспекти енергозбереження**

УДК 66.01: 66.011

## **НОВІ КАТАЛІЗАТОРИ КОНВЕРСІЇ МОНООКСИДУ КАРБОНУ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ**

Івкіна Є.С., к.т.н., доц. Кузнецов С.І.

*Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький*  
ksieko1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Кузнецов С.І.

При роботі котелень на рідкому, твердому або газоподібному паливі, в атмосферу викидається ціла низка шкідливих речовин. Найбільш небезпечними з яких є монооксид карбону. Враховуючи, що у кожному місті чи промисловому регіоні функціонує кілька десятків, а іноді й сотень котелень, абсолютна маса монооксиду карбону, який потрапляє в атмосферу, становить тисячі тонн на рік. У звичайних умовах він є індиферентним газом, і найбільш ефективним методом нейтралізації, є каталітичне доокислення його до двооксиду карбону.

Монооксид карбону – безбарвний газ, без запаху, але має сильні токсичні властивості, він у 300 разів швидше за кисень розчиняється у крові, а його концентрація у повітрі 0,32% є летальною. Існуючі методи очищення газових викидів від монооксиду карбону часто є вузькоспеціалізованими або дуже коштовними.

Відомі на сьогоднішній день каталізатори для доокислення монооксиду вуглецю, не використовуються для санітарного очищення великих обсягів газів. Існує кілька причин, що перешкоджають використанню цих методів. Головними із них, є висока вартість каталізаторів та великі енергетичні витрати на нагрівання газів до температури запалювання каталізатора. Крім того, у відхідних газах часто присутні домішки, які можуть отруювати каталізатор. В даний час питання промислового очищення газів від монооксиду карбону залишається невирішеним.

В ХНТУ розроблено каталізатори [1, 2], які в змозі вирішити проблему очистки відхідних газів теплоенергетичних підприємств від монооксида карбону.

При синтезі каталізаторів, які можуть бути використані для конверсії монооксиду карбону ключові значення мають такі параметри, як порядок реакції і температурний коефіцієнт. У роботі вивчено кінетику реакції, визначено й досліджено основні параметри, які дозволяють надати комплексну оцінку розробленим каталізаторам. Відносно низькі значення температурного коефіцієнта та енергії активації дозволяють зробити висновок, що реакція окислення оксиду карбону на розроблених мідно-марганцевих каталізаторах протікає в дифузійній області. Про це свідчить перший порядок реакції. Сумарна енергія розривання молекулярних зв'язків, становить біля 1200 кДж/моль, що практично виключає протікання реакції без каталізатора. При каталітичній взаємодії монооксид карбону забирає кисень у каталізатора, а

вода повертає його каталізатору, причому обидва процеси протікають одночасно. Протікання реакції по механізму сумісної взаємодії призводить до значного зниження енергетичного бар'єру. Це дозволяє здійснювати процес за відносно низьких температур і великих об'ємних швидкостях. Найбільш ефективним засобом прискорення процесів, що протікають у дифузійній області, є зниження розмірів зерен каталізатора, а також застосування каталізаторів з розвиненою поверхнею, де великі пори є транспортними шляхами до високорозвиненої поверхні, яка створюється тонкими порами малої довжини. Експериментальні дані свідчать, що досліджені каталізатори проявляють активність вже при температурі 150 °С. Ступінь перетворення монооксиду карбону досягає максимальних значень при температурі 300 °С. Синтезовані трубчасті каталізатори проявляють більш високу активність ніж промисловий низькотемпературний каталізатор НТК-4. Наявність у газі водяної пари не знижує активність запропонованих каталізаторів.

Швидкість реакції гетерогенного окислення монооксид карбону на каталізаторі виражається рівнянням:

$$U = K[C_{CO}]^n \cdot [C_{O_2}]^m, \quad (1)$$

де  $K$  – константа швидкості реакції;  $C_{CO}, C_{O_2}$  – концентрації реагуючих речовин;  $n, m$  – показники ступеня, що характеризують порядок реакції за цим компонентом.

При надлишку кисню реакція каталітичного окиснення оксиду вуглецю протікає по першому порядку щодо оксиду вуглецю та нульовому порядку щодо кисню. Загальний порядок реакції дорівнює одиниці.

При нестачі кисню порядок реакції по кисню можна визначити із співвідношення:

$$n = \frac{\lg \frac{U_2}{U_1}}{\lg \frac{C_{O_2}}{C'_{O_2}}} = \frac{\lg \frac{70 \cdot 10^{-5}}{35 \cdot 10^{-5}}}{\lg \frac{2}{1}} = 1, \quad (2)$$

де  $U_1$  та  $U_2$  – швидкості реакції при концентраціях кисню  $C_{O_2}$  и  $C'_{O_2}$ .

Для визначення порядку реакції з кисню використані експериментальні дані. Результати досліджень показують, що при надлишку кисню швидкість процесу не залежить від його концентрації в газовій суміші, а при нестачі – пропорційна їй. Отже, при нестачі кисню в газовій суміші до стехіометричного співвідношення, реакція окислення СО на мідь-марганцевих каталізаторах протікає за рівнянням другого порядку (перший по СО та перший по  $O_2$ ).

Константа швидкості при цьому виражається рівнянням:

$$K_{AB} = \frac{a \cdot \ln \left[ \frac{A}{A_0} \cdot \frac{B_0}{B} \right]}{\tau \cdot [B \cdot A_0 - a \cdot B_0]}, \quad (3)$$

де «а» та «в» – коефіцієнти стехіометричного рівняння.

Збільшення концентрації кисню вище стехіометричної норми призводить до зниження загального порядку реакції до першого. Враховуючи, що промисловий процес санітарної очистки газів, як правило, протікає при надлишку кисню, більший інтерес становить кінетичне рівняння першого порядку:

$$K_A = \frac{1}{\tau} \cdot \ln \frac{A_0}{A}. \quad (4)$$

Це рівняння використано при подальших розрахунках констант швидкості для реакцій окислення оксиду вуглецю.

Розроблені каталізатори мають високу продуктивність, активність вибірковості, механічну міцність і термостійкість, а також мають малу отруйність, низький гідравлічний опір, низьку температуру запалювання, низьку собівартість. Технологія виготовлення каталізаторів проста і надійна, не передбачає використання дефіцитної сировини та складного обладнання, для формування контактних мас використані такі дешеві та доступні речовини, як кокс та пемзобетон. Розроблені каталізатори можуть бути використані на теплоенергетичних підприємствах, для очищення великих обсягів газів, від монооксиду карбону.

#### Список літератури:

1. Деклараційний патент на винахід Україна 62855А, ІРС 7 V01D47/00, C10K1/00. Спосіб очищення відхідних газів котельних від оксиду вуглецю та пристрій для його реалізації / Кузнецов С.І. (Україна); заявл 1.04.09.03; публ. 15.12.03, Бюл. №12, 2003.

2. Деклараційний патент на винахід Україна 62856А, ІРС 7B01D47 / 00, B01D47 / 08, C10K1 / 00, C10K1 / 34. Спосіб очищення відхідних газів котельних текстильних підприємств / Кузнецов С.І. (Україна); заявл 1.04.09.03; публ. 15.12.03, Бюл. №12, 2003.

УДК 662.94:628.512

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРВИННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ $\text{NO}_x$ ПРИ СПАЛЮВАННІ МАЗУТУ

Овчаренко І.О., PhD, ас. Беднарська І.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
ovcharenko.i.o.-ta42@edu.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Екологічна безпека об'єктів теплової енергетики є одним із ключових пріоритетів розвитку сучасної промисловості в умовах посилення природоохоронного законодавства та зростання вимог до якості атмосферного повітря. Серед усіх забруднювальних речовин, що утворюються під час спалювання органічного палива в котлах теплових електростанцій, особливе місце посідають оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) [1] і включають переважно монооксид азоту  $\text{NO}$  та діоксид азоту  $\text{NO}_2$ . Ці сполуки становлять серйозну загрозу для здоров'я населення [2]. Крім того, діоксид азоту є парниковим газом, який впливає на глобальні кліматичні зміни. Саме тому скорочення викидів оксидів азоту від стаціонарних джерел спалювання палива є одним із найактуальніших завдань сучасної промислової екології та теплоенергетики [3].

Оскільки встановлення дорогих систем очищення димових газів від оксидів азоту, таких як селективне каталітичне або некаталітичне відновлення, потребує значних капітальних вкладень та експлуатаційних витрат, особливого значення набувають так звані первинні заходи скорочення викидів  $\text{NO}_x$  [4]. Ці заходи є технологічними прийомами, які реалізуються безпосередньо в процесі організації горіння і спрямовані на пригнічення утворення оксидів азоту ще на стадії їх генерації в топковому просторі. До найбільш поширених первинних заходів належать ступенева подача повітря, рециркуляція димових газів у зону горіння, використання малотоксичних пальників спеціальної конструкції, подача третинного повітря, а також різноманітні комбінації цих методів. Кожен із зазначених заходів має власну ефективність зниження викидів  $\text{NO}_x$ , яка визначається емпірично і залежить від типу палива, конструкції котла та режимних параметрів його роботи.

Метою даного дослідження є встановлення кількісної залежності показника емісії оксидів азоту під час спалювання мазуту заданого складу від типу застосованих первинних заходів скорочення викидів  $\text{NO}_x$ .

Для досягнення поставленої мети вирішувалась низка послідовних завдань. Перше завдання полягало у визначенні теплотехнічних характеристик вихідного мазуту, зокрема його елементного складу на робочу масу та нижчої теплоти згоряння [5, 6]. Друге завдання передбачало розрахунок базового показника емісії оксидів азоту для факельного спалювання мазуту без урахування будь-яких заходів зі зменшення викидів. Третє завдання зводилось до послідовного застосування коефіцієнтів ефективності для різних типів

первинних заходів, зокрема малотоксичних пальників, ступеневої подачі повітря, рециркуляції димових газів та їх комбінацій [7]. Четверте завдання полягало у проведенні порівняльного аналізу отриманих результатів та визначенні найбільш ефективного з точки зору екологічності поєднання первинних заходів для даного енергоблоку [8].

Об'єктом дослідження виступали фізико-хімічні процеси утворення оксидів азоту в топковому просторі котла під час спалювання мазуту. Предметом дослідження є безпосередньо кількісна залежність показника емісії оксидів азоту від типу та комбінації застосованих первинних технологічних заходів зі зменшення емісії  $\text{NO}_x$ . У роботі використано нормативну методику визначення показників емісії забруднювальних речовин від енергетичних установок, яка базується на узагальнених показниках емісії та емпіричних коефіцієнтах, що враховують вплив теплового навантаження котла та ефективність первинних заходів [4].

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані результати дозволять обґрунтовано обрати оптимальну стратегію модернізації пальникових пристроїв та систем подачі повітря на діючих мазутних котлах з метою досягнення нормативних показників гранично допустимих викидів оксидів азоту без необхідності встановлення вартісних систем очищення димових газів. Крім того, проведене порівняння дасть змогу оцінити економічну доцільність впровадження того чи іншого первинного заходу шляхом зіставлення досягнутого екологічного ефекту з необхідними капіталовкладеннями та експлуатаційними витратами.

За результатами розрахункової частини з визначення показників емісії ( $k_{\text{NO}_x}$ , г/ГДж) для різних варіантів первинних заходів можна провести порівняльний аналіз отриманих результатів та зробити висновки щодо ефективності досліджених технологічних рішень. Результати зведені до діаграми, яка зображена на рис. 1.

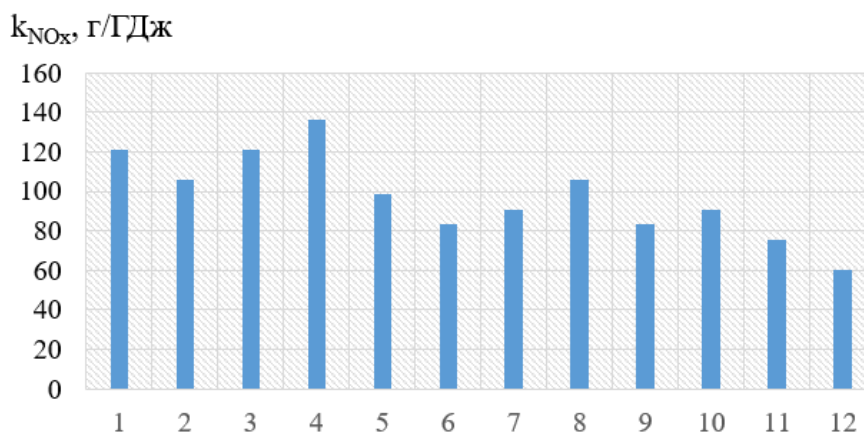


Рисунок 1 – Показник емісії оксидів азоту при різних комбінаціях первинних заходів

На рис. 1: 1 – малотоксичні пальники; 2 – ступенева подача повітря; 3 – подача третинного повітря; 4 – рециркуляція димових газів; 5 – трьохступенева подача повітря та палива; 6 – малотоксичні пальники + ступенева подача

повітря; 7 – малотоксичні пальники + подача третинного повітря; 8 – малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів; 9 – ступенева подача повітря + подача третинного повітря; 10 – ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів; 11 – малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + рециркуляція; 12 – малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + третинне повітря.

Найменш ефективним серед первинних технологічних заходів зі зменшення емісії  $\text{NO}_x$  є рециркуляція димових газів ( $k = 136,1$  г/ГДж), яка дає зниження лише на 10 % від базового рівня. Найбільш ефективною є комбінація малотоксичних пальників, ступеневої подачі повітря та третинного повітря ( $k = 60,5$  г/ГДж), що знижує емісію на 60 %.

Отже, поєднання кількох первинних заходів дозволяє суттєво зменшити викиди  $\text{NO}_x$  без встановлення дорогих азотоочисних установок.

Отримані дані можуть бути використані для вибору оптимальної стратегії модернізації котельного обладнання.

### Список літератури:

1. Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. – Київ: Мінекоресурсів України, 2001. – 156 с.

2. Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання та контролю забруднення). – Офіційний вісник Європейського Союзу, L 334, 17.12.2010. – С. 17–119.

3. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. – 62 с.

4. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ: ОЕП "ГРІФРЕ", 2002. – 42 с.

5. Усов І.Л. Підвищення екологічної ефективності теплових електростанцій: аналіз технологій очищення викидів та підходів до модернізації / І.Л. Усов, Т.В. Шелешей // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2025. – Т.36(75), №6(1). – С.141-148.

6. Шелешей Т. Порівняльний аналіз рівня емісії оксидів азоту при спалюванні антрацитового штибу на різних енергетичних установках / Т. Шелешей, І. Беднарська, Л. Майер, В. Юрчук // Молодий вчений. – 2020. – № 5 (81). – С. 129-132.

7. Шелешей Т. Викиди вуглекислого діоксиду при спалюванні різних видів палива та побудова номограм для розрахунку оксидів азоту / Т. Шелешей, І. Беднарська, О. Власенко, В. Сиваченко, В. Корчма, Х. Матусевич // SWorldJournal. – 2023. – Iss. 21, part 1. – P. 21-26.

8. Sheleshey T. Quantitative indicators of nitrogen oxides when used at different energy installations / T. Sheleshey, I. Bednarska, A. Kutsa, K. Tsyhanov, I. Olymenko, Y. Apostol // In Sworld-US Conference proceedings (2023, March). – 2023. – No. usc17-01. – P. 12-14.

УДК 662.613.1

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ НА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ УКРАЇНИ

Кебус С.В.

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро*  
kebus@365.dnu.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Золотько О.В.

В Україні теплова енергетика забезпечує близько 30% загальних викидів шкідливих речовин [1]. Теплові електростанції та електроцентралі (ТЕС та ТЕЦ), особливо ті, що працюють на твердому паливі, є значними забруднювачами атмосферного повітря. Основними шкідливими викидами є пилові частинки, оксиди сірки та азоту [2, 3]. Проблема ускладнюється тим, що більшість газоочисного обладнання теплоенергетики експлуатується понад 50 років і не відповідає сучасним екологічним вимогам [3].

Великі ТЕС – Криворізька, Бурштинська, Трипільська, Придніпровська та інші, Дарницька, Київська ТЕЦ для очищення газів від пилу використовують багатопільні електрофільтри. На їхню роботу впливає багато факторів [2], серед них: напруженість електричного поля, високий питомий електричний опір шару пилу, швидкість та температура газів, ефективність роботи системи струшування пилу. Якщо оптимізувати параметри процесу очистки та впливати на характеристики пилу та газів, можна підвищити ефективність уловлювання пилу до 98 % [2]. Згідно з [4], сучасні електрофільтри можуть досягати ефективності 99,9 %, а остаточна концентрація пилу після очистки залишається не більше 20 мг/м<sup>3</sup>.

На ряді енергоблоків Придніпровської, Зміївської, Сумської, Чернігівської ТЕС та ТЕЦ, які спалюють високозольне тверде паливо, використовують мокрі системи золоуловлювання для очистки димових газів на базі скрубєрів Вентурі [3]. Ними оснащено близько 46% котлів на українських ТЕС та ТЕЦ малої та середньої потужності. Цей спосіб дає змогу одночасно вловлювати золу та діоксид сірки, якщо використовувати водний розчин аміаку [3]. Іноді економічно вигідніше збільшити витрату рідини в існуючих скрубєрах, ніж повністю змінювати обладнання. Основним недоліком використання цього методу є необхідність утримування шламового господарства.

Крім забруднення атмосферного повітря місць розташування ТЕС та ТЕЦ застаріле обладнання зумовлює високі екологічні платежі, які регулюються Податковим кодексом України [3, 4]. Впровадження ефективних систем очищення або їх модернізація дозволяють зменшити ці платежі та уникнути штрафів за перевищення лімітів викидів.

Частина малих та середніх ТЕЦ, наприклад Дарницька ТЕЦ, здійснила екологічну модернізацію застарілого очисного устаткування, використовуючи тканинні рукавні фільтри [5]. Це дозволило суттєво знизити кількісні показники

викидів золи в межах житлових масивів Києва. Рукавні фільтри дозволяють підтримувати концентрацію пилу на виході з них в межах 10–20 мг/м<sup>3</sup>, що вимагається Директивою 2010/75/ЄС. У якості переваги використання таких очисних апаратів можна зазначити незалежність ефективності їхньої роботи від електроопору золи, що є проблемою для електрофільтрів.

Гібридні фільтри можна розглядати як перспективний напрям модернізації систем очищення димових газів на великих ТЕС України. Це комбіновані системи фільтрації, що поєднують декілька видів очистки, наприклад, електростатичну та механічну, тобто гібридний фільтр для ТЕС – це поєднання секції електрофільтру та секції рукавного фільтру. Вони забезпечують високий рівень очищення та можуть використовуватися на діючих підприємствах без повної заміни обладнання. В однопільному електрофільтрі частинки крупно та середньо дисперсного пилу заряджаються за допомогою електростатичного поля та осаджуються на осаджувальних електродах, а в рукавному фільтрі затримуються дрібнодисперсні частинки пилу. Порівняно із рукавними фільтрами одне поле електрофільтру здатне видалити близько 90 % вмісту пилу у викидах при незначному енергоспоживанні. Оскільки у рукавний фільтр проходить тільки 10 % вловлюваного пилу, об'єм використаного стисненого повітря для регенерації фільтру зменшується, що подовжує термін його служби та збільшує час між регенераціями. Таким чином використання гібридного фільтру дозволяє досягти високої ефективності очистки (до 99,9 %) при зменшенні енергоспоживання та збільшенню терміну служби фільтрів.

Для ТЕЦ України доцільним є поєднання модернізації електрофільтрів із використанням мокрих скрубєрів для комплексного очищення від пилу та SO<sub>2</sub>. Подальший розвиток таких технологій пов'язаний із удосконаленням конструкцій та підвищенням їх надійності.

### Список літератури:

1. Князь С.В. Електрофільтри в системах очищення промислових газів [Електронний ресурс] / С.В. Князь // Ефективна економіка. – 2014. – № 2. – Режим доступу: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=2783>. – Назва з екрану.
2. Золотько О.В. Аналіз факторів, які визначають ефективність роботи електрофільтрів / О.В. Золотько, О.Є. Золотько, Т.І. Русакова, Ю.В. Войтенко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2025. – № 81. – С. 242-252.
3. Горяной С.В. Застосування технологій очищення димових газів для твердопаливних котлів теплоелектроцентралей / С.В. Горяной, І.А. Вольчин // Проблеми машинобудування. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 45-56.
4. Безвозюк Г.Г. Електрофільтри для очищення газових викидів промисловості / Г.Г. Безвозюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Технічні науки. – 2015. – №70. – С. 45-52.
5. Greenex Eco. Фільтри циклонного типу VCF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://greenex-eco.com/solutions/filtry-cyklonnogo-tipu-bsf/>. – Назва з екрану.

УДК 628.52: 504.06

## АНАЛІЗ КІЛЬКОСТІ ВИКИДІВ ОКСИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПРИ СПАЛЮВАННІ РІЗНИХ МАРОК МАЗУТУ

Улаш Т.К., к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
ulash.t.k.-ta41@edu.kpi.ua

Науковий керівник: PhD, ас. Беднарська І.С.

Оксид вуглецю (СО) є одним із найнебезпечніших токсичних компонентів продуктів згоряння, поява якого свідчить про хімічну неповноту згоряння палива ( $q_3$ ) [1]. Для котлів із рідким шлаковидаленням, які працюють при надвисоких температурах факела (1500-1700 °С), механізм утворення СО має специфічний характер: з одного боку, високі температури сприяють повному окисненню вуглецю, з іншого – спалювання мазуту як резервного палива в таких топках часто супроводжується порушенням аеродинаміки та недопалом через баластні складники палива.

Для оцінки емісії оксидів вуглецю було використано математичний апарат, що базується на тепловому балансі та елементному складі робочої маси палива [2]. Нижча теплота згоряння ( $Q_r^i$ ) розраховувалась за повною формулою Менделєєва, що враховує ендотермічні ефекти випаровування вологи палива. Для визначення об'єму продуктів згоряння розраховувався теоретично необхідний об'єм повітря ( $V^0$ ) на 1 кг мазуту. Питомий викид оксиду вуглецю ( $k_{CO}$ ) визначався через коефіцієнт хімічного недопалу ( $q_3$ ), який для мазуту в нетипових для нього топках (вугільних) коливається в межах 0,01-0,05% залежно від вологості [3].

Для проведення математичного моделювання емісійних показників було обрано потужний енергоблок з паровим котлом, що конструктивно розрахований на спалювання вугілля з високим вмістом летких речовин ( $V^{daf} \approx 40\%$ ) та обладнаний системою рідкого шлаковидалення [4]. Оскільки такий тип топки вимагає підтримання стабільно високих температур факела (>1500 °С) для вільного витікання розплавленого шлаку, використання мазуту як резервного або пускового палива має суттєвий вплив на загальну екологічну картину об'єкта.

Основними розрахунковими факторами, що визначають вихід оксиду вуглецю (СО) при використанні мазуту в даній установці, було обрано вміст вуглецю ( $C^r$ ), вологість ( $W^r$ ) та сірчистість ( $S^r$ ) палива на робочу масу [5]. Ці параметри критично впливають на якість розпилення палива форсунками та швидкість дифузійних процесів у зоні горіння.

У ході дослідження було змодельовано три характерні сценарії складу мазуту:

1. Малосірчистий мазут: якісне паливо з мінімальним вмістом баласту, що забезпечує максимальну теплоту згоряння та стабільність факела.

2. Середньосірчистий мазут: типовий топочний мазут із помірним обводненням.

3. Високосірчистий / обводнений мазут: низькоякісне паливо з високим вмістом води, що часто зустрічається при тривалому зберіганні на ТЕС і призводить до зниження адіабатичної температури горіння.

Для наочної демонстрації динаміки зростання техногенного навантаження при переході на низькоякісні або обводнені сорти мазуту результати математичного моделювання візуалізовано на рис. 1. Графічна інтерпретація даних дозволяє чітко простежити кореляцію між погіршенням елементного складу палива та експоненціальним зростанням емісії оксиду вуглецю.

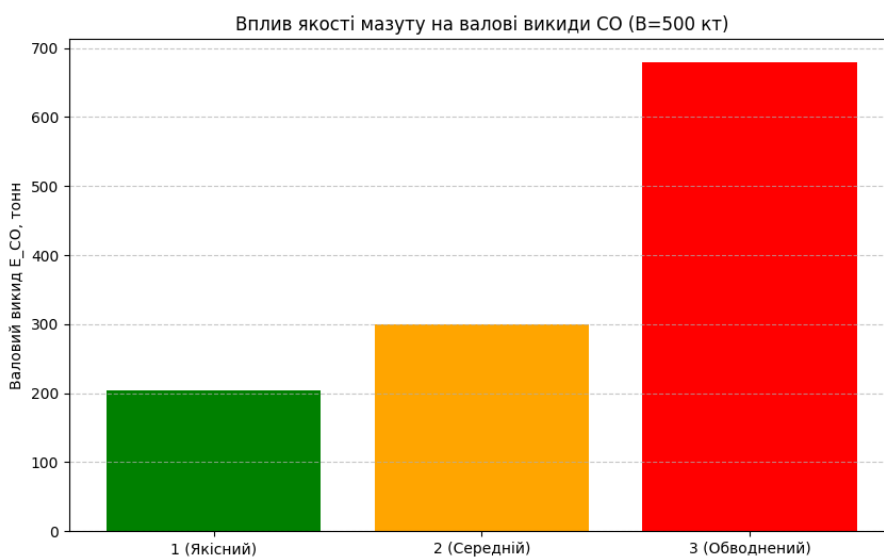


Рисунок 1 – Залежність валових викидів оксиду вуглецю від складу та ступеня обводненості мазуту

Проведений аналіз отриманих даних дозволяє виявити низку закономірностей, що визначають екологічний профіль енергоблоку при спалюванні мазуту різного складу. Вплив баластних складників на термодинаміку факела наступний. Згідно з розрахунками, збільшення робочої вологості мазуту з 0,8 % до 3,0 % (варіанти 1 та 3) призводить до суттєвого зниження нижчої теплоти згоряння палива  $Q_r^i$  (з 40,81 до 38,05 МДж/кг). В умовах котла з рідким шлаковидаленням це створює критичний вплив: витрати тепла на випаровування надлишкової води знижують температуру в ядрі горіння, що гальмує кінетику окиснення CO до CO<sub>2</sub>.

Залежність емісії від якості розпилення ( $q_3$ ) полягає в тому, що для вугільних котлів, де аеродинаміка топочного об'єму оптимізована під факел пиловугільного палива, спалювання в'язкого мазуту часто супроводжується нерівномірним змішуванням із повітрям. Підвищення вмісту сірки та води у варіанті 3 корелює зі зростанням модельного коефіцієнта хімічного недопалу  $q_3$  до 0,035%, що викликає стрибок питомої емісії  $k_{CO}$  до 94,2 г/ГДж. Це підтверджує, що для мінімізації CO ключовим є не лише надлишок повітря, а й фізичний стан палива перед форсунками.

Кумулятивний екологічний ефект полягає в наступному. Аналіз валових

викидів демонструє, що при незмінній масовій витраті палива ( $B = 500$  кг), перехід на низькоякісний мазут збільшує викиди оксиду вуглецю майже на 70 % (з 1063,1 до 1792,2 т). Такий значний приріст зумовлений синергією двох факторів: зниженням енергоефективності палива та зростанням концентрації CO в продуктах згоряння через погіршення умов дифузійного горіння крапель.

Специфіка комбінованих сценаріїв. Якщо взяти до уваги змішане паливо, то такі тенденції показують лінійну залежність емісії від частки баласту, що дозволяє прогнозувати екологічні ризики при зберіганні різних партій мазуту в спільних резервуарах ТЕС.

Отже, проведений техніко-екологічний аналіз та математичне моделювання процесів спалювання мазуту в котлі з рідким шлаковидаленням дозволяють зробити наступні висновки:

- елементний склад палива, зокрема вміст вологи та сірки, є визначальним фактором впливу на енергетичну ефективність та екологічну безпеку енергоблоку;

- зростання вологості мазуту з 0,8 % до 3,0 % призводить до зниження нижчої теплоти згоряння на 6,7 %, що в умовах високотемпературної топки вугільного котла провокує нестабільність факела та зростання хімічного недопалу;

- питомий показник емісії  $k_{CO}$  демонструє стрімке зростання (майже у 1,8 рази) при погіршенні якості палива, що призводить до збільшення валового викиду оксиду вуглецю на 729 т на рік при незмінній масі спаленого палива;

- для мінімізації техногенного навантаження при роботі на резервному паливі необхідно забезпечувати жорсткий контроль параметрів мазуту перед форсунками, оскільки навіть незначне відхилення від проектних показників складу призводить до суттєвого перевищення нормативних викидів CO.

### Список літератури:

1. Вольчин І.А. Про Національний план скорочення викидів / І.А. Вольчин, І.А. Ращепкін // Зб. тез доповідей «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку». – 2014. – С. 23–26.

2. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ, 2002. – 120 с.

3. Sheleshey T. Analysis of quantitative characteristics of emissions of "greenhouse and thermal" gases depending on the type of fuel / T. Sheleshey, I. Bednarska, A. Kutsa, K. Tsyhanov, I. Olymenko, Y. Apostol // SWorldJournal. – 2023. – Iss.18-01. – P. 33-38.

4. Bednarska I. Assessment of the influence of the fuel oil brand on the sulfur angrides emissions in energy sites / I. Bednarska, T. Sheleshei, D. Ryndiuk, Y. Bednarska // Scientific notes of Taurida National V I Vernadsky University Series Technical Sciences. – 2020. – 1(2). – P. 231-236.

5. Шелешей Т. Перспективи використання сіркоочисних установок на великих енергетичних об'єктах / Т. Шелешей, І. Беднарська, Л. Майер // Молодий вчений. – 2020. - № 4 (80). – С. 240-243.

УДК 620.9:504.05:502.131.1

## **ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ЯК ФАКТОР СТІЙКОСТІ ТА ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ**

Кирилів Б.В.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,*

*м. Івано-Франківськ*

bohdan.kyryliv-eko231@nung.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Орфанова М.М.

Енергетичний сектор України в умовах повномасштабної війни функціонує під впливом системних деструктивних чинників, зокрема руйнування генеруючих потужностей і мережевої інфраструктури, дефіциту паливно-енергетичних ресурсів, а також високої волатильності попиту і пропозиції на енергетичному ринку. За таких умов енергозбереження трансформується з інструменту підвищення економічної ефективності у ключовий фактор забезпечення енергетичної безпеки та стійкості енергосистеми [1].

Метою дослідження є аналіз ролі відновлюваної енергетики та енергозбереження у забезпеченні стійкості та декарбонізації економіки України в умовах воєнного стану.

Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні ролі енергозбереження як активного чинника структурної трансформації енергосистеми України, який у поєднанні з розвитком децентралізованої генерації сприяє підвищенню її стійкості та адаптивності до кризових умов функціонування. Доведено, що скорочення енергоспоживання є економічно доцільним інструментом декарбонізації, оскільки безпосередньо впливає на зменшення обсягів використання викопного палива та відповідних викидів CO<sub>2</sub>.

Сучасні підходи до розвитку енергетики базуються на концепції енергетичної стійкості (energy resilience), яка передбачає здатність енергосистеми адаптуватися до нових викликів, швидко відновлювати функціонування та забезпечувати безперервність енергопостачання [4]. У цьому контексті енергозбереження виступає базовим елементом такої стійкості, оскільки зниження навантаження на енергосистему дозволяє зменшити ризики дефіциту потужностей та підвищити гнучкість балансування.

Аналіз розвитку відновлюваної енергетики свідчить про стійку тенденцію до зростання встановлених потужностей ВДЕ в Україні, зокрема у сегментах сонячної та вітрової енергетики, а також про поступове розширення ролі децентралізованих енергетичних систем. Загалом спостерігається зміщення енергетичного балансу у напрямі збільшення частки відновлюваних джерел енергії та активізація процесів декарбонізації. Динаміка зазначених змін за видами ВДЕ наведена в табл. 1 [1; 3], що свідчить про трансформацію структури енергосистеми.

## Динаміка встановлених потужностей ВДЕ в Україні (МВт)

№	Тип ВДЕ	2014	2017	2019	2021	2023	2024*	2025-2026**
1	Вітрова енергетика	183,1	325,7	1170	1673	1900,8	2050	2400
2	Сонячна енергетика (пром.)	753,5	1339,9	4925	6227	6350	6600	7200
3	СЕС домогосподарств	–	–	553	1205	1450	1750	2100
4	Мала гідроенергетика	188,4	95,0	114	121	122	125	130
5	Біомаса та Біогаз	200,6	356,7	126,2	276	290	340	480
<b>РАЗОМ</b>		<b>1325,6</b>	<b>2117,3</b>	<b>6888,2</b>	<b>9502</b>	<b>10112,8</b>	<b>10865</b>	<b>12310</b>

\* оціночні дані станом на кінець 2024 року;

\*\* прогнольні показники згідно з цілями НПДВЕ до 2030 року.

Представлені дані демонструють, що в період до 2021 року основний акцент робився на централізовану промислову генерацію, то в умовах 2024–2026 років критичного значення набуває мала децентралізована генерація. Зокрема, прогнозоване зростання потужностей сонячних електростанцій домогосподарств до 2100 МВт у 2026 році свідчить про формування сегменту активних споживачів електроенергії (prosumers), які одночасно виступають виробниками. Така тенденція сприяє підвищенню рівня енергетичної автономії територіальних громад та зниженню навантаження на магістральні електричні мережі в періоди пікового споживання.

Особливої уваги заслуговує розвиток вітрової енергетики, яка навіть у складних безпекових умовах демонструє стабільний приріст за рахунок реалізації проектів у більш захищених західних та центральних регіонах країни, досягаючи прогнозованої позначки 2400 МВт до кінця 2026 року. Водночас сектор біомаси та біогазу стає ключовим елементом заміщення імпортованого природного газу, що безпосередньо корелює із загальнодержавними завданнями енергозбереження та декарбонізації промислового сектору. У цьому контексті енергозбереження трансформується в активний інструмент, що збільшує корисний ефект від виробленої електроенергії з відновлюваних джерел, що є критично важливим за умов перманентного дефіциту генеруючих потужностей.

Попри значні руйнування та тимчасову окупацію частини потужностей на півдні країни у 2022–2023 роках, сектор виробництва електроенергії демонструє високу адаптивність, що є ключовою ознакою концепції енергетичної стійкості.

Водночас умови воєнного стану зумовлюють необхідність перегляду підходів до використання енергетичних ресурсів. Впровадження інтегрованих систем енергоменеджменту, проведення глибокої термомодернізації будівель та застосування цифрових систем моніторингу споживання енергії сприяє зниженню енергоемності валового внутрішнього продукту навіть за умов обмежених фінансових можливостей [3, 5].

У період 2024–2026 років спостерігається активізація впровадження інтелектуальних мікромереж (microgrids) та систем накопичення енергії (energy storage systems), які у поєднанні з локальною генерацією забезпечують підвищення надійності енергопостачання та зменшення залежності споживачів від централізованої інфраструктури. Це створює передумови для формування локальних енергетичних систем з високим рівнем автономності [2, 6].

Важливим стратегічним вектором розвитку є Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року (розпорядження КМУ № 761-р), який встановлює амбітну ціль досягнення 27 % частки ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії [7].

Крім того, державна політика сьогодні чітко орієнтована на поглиблену інтеграцію до єдиного європейського енергетичного простору та повну синхронізацію з ENTSO-E, що висуває енергоефективність як ключову вимогу для забезпечення конкурентоспроможності української продукції на ринках ЄС в умовах дії транскордонних механізмів вуглецевого коригування.

Впровадження концепції «зеленого відновлення» (*green recovery*) передбачає, що відбудова зруйнованої інфраструктури повинна базуватися не на відновленні застарілих енергоємних технологій, а на створенні якісно нової, гнучкої та низьковуглецевої енергосистеми.

Таким чином, енергозбереження слід розглядати як фундаментальний системоутворюючий елемент сучасної енергетичної трансформації України, що забезпечує синергію між економічною доцільністю, екологічною безпекою та енергетичною стійкістю держави. Поєднання гнучкого управління попитом із прискореним розвитком відновлюваних джерел енергії формує надійну основу для подолання наслідків воєнної агресії та переходу до моделі сталого розвитку, яка відповідає європейським стандартам [1, 4, 7].

### Список літератури:

1. Мельник Л.Г. Еколого-економічні аспекти переходу України на «зелену» енергетику в умовах воєнного стану / Л.Г. Мельник, О.І. Карінцева, Д.В. Пархоменко, О.В. Кубатко, Ю.М. Завдов'єва // Київський економічний науковий журнал. – 2025. – № 8. – С. 173-182.

2. Нестеренко С.А. Оцінка економічної доцільності переходу на відновлювані джерела енергії в умовах війни та дефіциту ресурсів / С.А. Нестеренко, К.І. Чумаков, С.Г. Суворова // Актуальні питання у сучасній науці. – 2026. – № 2. – С. 157-177.

3. Павлик А.В. Еколого-економічне оцінювання ефективності використання відновлювальних джерел енергії : дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: 08.00.06 – Економіка природокористування та охорони навколишнього середовища / Анатолій Володимирович Павлик ; М-во освіти і науки України, Сумський державний університет. – Суми, 2019. – 214 с. – Електрон. аналог друк. вид.: режим доступу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7b11608e-2ce3-49aa-9674-00ce37596790/content> (дата звернення: 28.04.2026). – Назва з екрану.

4. Rzayeva U. Development of an integrated model for emission reduction through energy efficiency and renewable energy [Electronic resource] / U. Rzayeva, R. Balayev, E. Ahmadzade, K. Mirzammadova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 6, No. 10 (138). – P. 14-21. – Access mode: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/345067> (last access:28.04.2026). – Title from the screen.

5. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2024 [Electronic resource]. Abu Dhabi, 2025. – Access mode: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA\\_TEC\\_RPGC\\_in\\_2024\\_2025.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf) (last access: 28.04.2026). – Title from the screen.

6. Відновлювана енергетика України 2025: огляд стану та перспектив [Електронний ресурс]. – ВДО в Україні, 2025. – Режим доступу: <https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2025/vidnovlyuvalna-energetika-ukrayiny-2025-oglyad-vyklyku-perspektyvu> (дата звернення: 28.04.2026). – Назва з екрану.

7. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 28.04.2026). – Назва з екрану.

УДК 621.311.22:504.3.054

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ СІРКИ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЛЯ ЗАЛЕЖНО ВІД СКЛАДУ ПАЛИВА

Усов І.Л.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського, м. Київ  
usov.ivan99@gmail.com*

Науковий керівник: к.т.н, доцент Шелешей Т.В.

Забруднення атмосферного повітря оксидами сірки є одним із найгостріших екологічних викликів для теплової енергетики України. Діоксид сірки  $SO_2$  та триоксид  $SO_3$ , що утворюються під час спалювання сірковмісного вугілля, спричиняють кислотні дощі, погіршення якості атмосферного повітря та негативно впливають на здоров'я населення в промислових регіонах. Відповідно до вимог екологічного законодавства України та директив ЄС щодо промислових викидів, підприємства теплової енергетики зобов'язані забезпечувати нормативні рівні викидів забруднюючих речовин.

Ефективне управління викидами  $SO_2$  неможливе без точного знання їх кількісних характеристик залежно від якісного складу палива, що спалюється. Різні марки та родовища вугілля суттєво відрізняються за вмістом сірки  $S^r$  та нижчою теплотою згорання  $Q_i^r$ , що безпосередньо впливає на обсяг викидів на одиницю виробленої теплоти. Встановлення цих залежностей є необхідним кроком для обґрунтування доцільності впровадження установок десульфуризації димових газів і вибору оптимальної технології очищення.

Метою роботи є розрахунок та аналіз питомих і валових викидів  $SO_2$  при факельному спалюванні 10 видів вугілля у котлі з рідким шлаковидаленням за відсутності установок очищення димових газів від оксидів сірки, а також побудова графіків залежності обсягів викидів від складу палива [1].

Методика розрахунку питомих викидів діоксиду сірки  $k_{SO_2}$  відповідно до ГКД 34.02.305–2002 полягає у визначенні кількості сірки в паливі та врахуванні ступеня її зв'язування і очищення димових газів. Для цього використовують дані про масовий вміст сірки  $S^r$  і нижчу теплоту згорання палива  $Q_i^r$ . Розрахунок виконують за формулою:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_r)(1 - \eta_{II}\beta). \quad (1)$$

Отримане значення дозволяє визначити питомі викиди  $SO_2$  (г/ГДж) з урахуванням як характеристик палива, так і ефективності природоохоронних заходів.

Розрахунок виконано для десяти видів вугілля відповідно до джерела [2]. Досліджуваний паливний ряд характеризується широким діапазоном зміни основних параметрів: масовий вміст сірки  $S^r$  варіює від 0,40 % (паливо №9, Мукачевське) до 4,00 % (паливо №1), тоді як нижча теплота згорання  $Q_i^r$

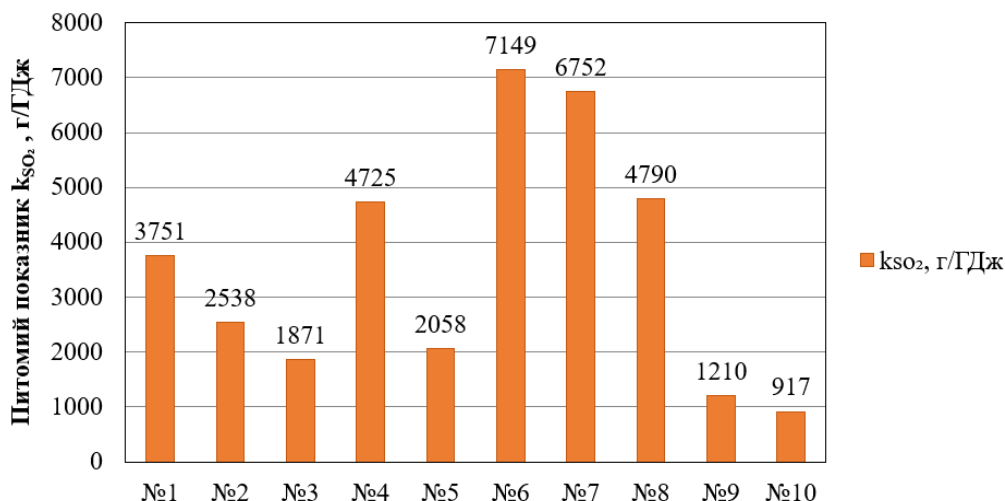
змінюється в межах 6,28–27,42 МДж/кг. Узагальнені результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку викидів SO<sub>2</sub>

№	Назва палива	S <sub>p</sub> , %	Q <sub>н<sup>p</sup></sub> , МДж/кг	k <sub>SO<sub>2</sub></sub> , г/ГДж
1	Паливо 1	4.00	20.260	3 751
2	Паливо 2 (Донецький)	3.30	24.700	2 538
3	Паливо 3	2.70	27.420	1 871
4	Паливо 4	3.80	15.280	4 725
5	Паливо 5	2.30	21.230	2 058
6	Паливо 6 (Александрівськ.)	2.60	6.910	7 149
7	Паливо 7 (Тростянецьк.)	3.60	10.130	6 752
8	Паливо 8 (Коломийськ.)	3.60	14.280	4 790
9	Паливо 9 (Мукачевськ.)	0.40	6.280	1 210
10	Паливо 10 (Льв.-Волин.)	1.00	20.720	917

На рис. 1 наведено стовпчикову діаграму питомого показника емісії k<sub>SO<sub>2</sub></sub> (г/ГДж) для десяти видів вугілля. Значення показника змінюються в широкому діапазоні — від 917 г/ГДж (паливо №10) до 7149 г/ГДж (паливо №6). Найвищі значення спостерігаються для палив №6 і №7 (7149 та 6752 г/ГДж відповідно), що свідчить про їх найменшу екологічну ефективність у перерахунку на одиницю виробленої теплоти. Середні значення характерні для палив №4 і №8 (близько 4700–4800 г/ГДж), тоді як найнижчі показники зафіксовано для палив №9 і №10 (1210 та 917 г/ГДж відповідно). Отримані результати демонструють суттєву залежність питомих викидів від якості палива, зокрема вмісту сірки та теплоти згоряння.

Рисунок 1 – Питомий показник емісії k<sub>SO<sub>2</sub></sub> (г/ГДж) для 10 видів вугілля

**Висновки.** У результаті проведених розрахунків встановлено, що питомі викиди діоксиду сірки при спалюванні вугілля суттєво залежать від масового вмісту сірки в паливі та його енергетичних характеристик. Показано, що навіть за відносно помірною вмісту сірки низька теплота згоряння призводить до зростання питомих викидів у перерахунку на одиницю виробленої теплоти, що підтверджується максимальними значеннями для палив №6 і №7. Водночас найменші викиди характерні для палив із низьким вмістом сірки та достатньо високою теплотою згоряння (паливо №9 та №10).

Отримані результати свідчать про доцільність урахування не лише вмісту сірки, а й теплотворної здатності палива при екологічній оцінці його використання. Встановлена залежність підтверджує необхідність впровадження ефективних технологій десульфуризації димових газів, особливо при використанні низькокалорійного високосірчастого вугілля. Проведений аналіз може бути використаний для обґрунтування вибору палива та природоохоронних заходів з метою зниження екологічного навантаження від теплової енергетики.

#### Список літератури:

1. Вольчин І.А. Про Національний план скорочення викидів / І.А. Вольчин, І.А. Ращепкін // Зб. тез доповідей «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку». – 2014. – С. 23-26.
2. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ, 2002. – 120 с.
3. Bednarska I. Assessment of the influence of the fuel oil brand on the sulfur angrides emissions in energy sites / I. Bednarska, T. Sheleshei, D. Ryndiuk, Y. Bednarska // Scientific notes of Taurida National V I Vernadsky University Series Technical Sciences. – 2020. – 1(2). – P. 231-236.

УДК 504.03:004

## ЕКОЛОГІЧНИЙ СЛІД ЕЛЕКТРОННОГО ЛИСТА

Лещенко І.Г., Лещенко О.В., д.т.н., проф. Русакова Т.І.

*Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро*

Ira12leshch@gmail.com

Науковий керівник: д.т.н., проф. Русакова Т.І.

Останні десятиліття характеризуються стрімким розвитком цифрових технологій. У повсякденне життя активно увійшли Інтернет, соціальні мережі, мобільні застосунки, хмарні сервіси та різноманітні цифрові пристрої. Мільярди людей щодня використовують цифрові технології для роботи, навчання, спілкування, отримання інформації та вирішення побутових потреб. За сучасними оцінками, у 2025 році кількість користувачів електронної пошти у світі досягла близько 4,6 млрд осіб, що становить понад половину населення планети [1]. На рис. 1 представлені осереднені дані про кількість листів, які було надіслано за один день в період з 2018 по 2026 роки.

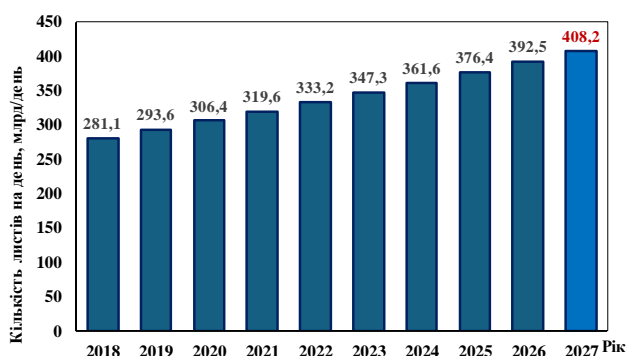


Рисунок 1 – Кількість електронних листів, млрд/день

Щоденно у світі надсилається приблизно 376 млрд електронних листів, а до 2027 року прогнозується зростання цього показника до понад 408 млрд листів на добу (рис.1).

На рис. 2 наведено темпи приросту кількості електронних листів надісланих за один день в період з 2018 по 2027 роки.

Аналіз графіка приросту показує, що протягом 2018–2026 років спостерігається стійка тенденція до збільшення кількості електронних листів, які надсилаються щоденно. Щорічний приріст поступово зростав із 12,5 млрд листів у 2018 році до максимального значення 16,1 млрд у 2026 році. Це свідчить про активний розвиток цифрових комунікацій, поширення онлайн-сервісів та збільшення кількості користувачів Інтернету.

Особливо помітне прискорення темпів приросту спостерігається у 2025–2026 роках, що може бути пов'язано зі зростанням популярності хмарних сервісів, дистанційної роботи, електронної комерції та автоматизованих розсилок. У 2027 році очікується зменшення приросту до 15,7 млрд листів, однак загальна тенденція залишається зростаючою, тобто обсяги електронного листування продовжують збільшуватися.

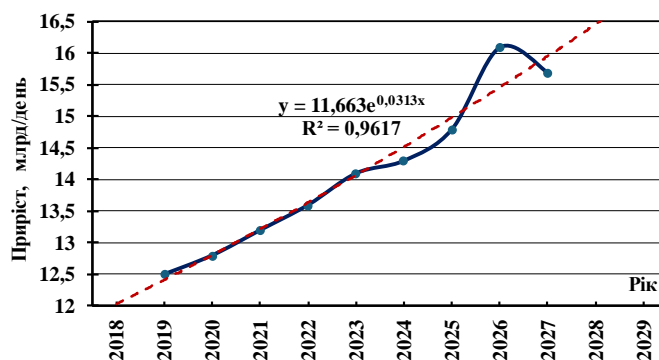


Рисунок 2 – Динаміка приросту кількості електронних листів у 2018–2027 роках, млрд/день

Отримані результати підтверджують, що цифрове навантаження на сервери та дата-центри постійно зростає. Відповідно збільшується і споживання електроенергії, необхідної для передачі, обробки та зберігання даних. Це свідчить про необхідність впровадження більш енергоефективних цифрових технологій та розвитку культури раціонального використання електронних сервісів. Тенденція зміни приросту електронних листів математично описується експоненційною залежністю (1) з достовірністю  $R^2 = 0,9617$ .

$$y = 11,663 \cdot e^{0,0313 \cdot x} \quad (1)$$

Разом із розвитком цифрових комунікацій формується так званий «цифровий» або «вуглецевий» слід. Вуглецевий слід електронного листа – це сукупність енергетичних витрат і викидів  $\text{CO}_2$ , які виникають під час створення, передавання, обробки, зберігання та відкриття електронного повідомлення. Енергоспоживання пов'язане з роботою персональних пристроїв користувачів, телекомунікаційних мереж, серверів і дата-центрів. За оцінками дослідників, один простий електронний лист без вкладень може спричинити близько 4 г  $\text{CO}_2$ , тоді як повідомлення з великими вкладеннями або зображеннями – від 10 до 50 г  $\text{CO}_2$  залежно від обсягу даних та джерел електроенергії [2].

Вплив електронної пошти на довкілля значною мірою пов'язаний із функціонуванням дата-центрів, у яких здійснюється обробка та зберігання інформації. Серверне обладнання працює безперервно цілодобово, споживаючи значні обсяги електроенергії. Додаткових енергетичних витрат потребують системи охолодження, резервного живлення та підтримки стабільної роботи мережевої інфраструктури. У сукупності це призводить до значних викидів парникових газів, особливо у країнах, де виробництво електроенергії базується переважно на викопному паливі. За даними сучасних досліджень, дата-центри та мережі передачі даних забезпечують близько 1–1,5 % глобального споживання електроенергії [3].

Водночас цифрові технології відіграють важливу роль у забезпеченні енергоефективності та розвитку сучасної енергетики. Вони сприяють оптимізації роботи електричних мереж, впровадженню систем автоматизованого управління, розвитку концепцій «розумного міста» та «розумних мереж» (Smart Grid), прогнозуванню споживання ресурсів і підвищенню ефективності виробничих процесів. Цифровізація дозволяє

зменшувати втрати енергії, підвищувати точність моніторингу та створювати нові можливості для ресурсозбереження у транспорті, промисловості та житлово-комунальному секторі [3].

Однак процес цифровізації має і негативні екологічні наслідки. Зростання кількості цифрових сервісів, пристроїв, потокового контенту та обсягів даних супроводжується постійним збільшенням енергоспоживання. Підтримка роботи серверів, телекомунікаційних мереж і хмарних платформ потребує значних ресурсів. Крім того, дослідники звертають увагу на так званий «ефект відскоку», коли підвищення ефективності цифрових технологій стимулює ще активніше їх використання, що зрештою може призводити до збільшення загального споживання енергії [4]. Таким чином, цифрові технології одночасно виступають інструментом енергозбереження та фактором зростання енергетичних витрат.

У зв'язку з тим, що навіть звичайні електронні листи формують вуглецевий слід і супроводжуються викидами CO<sub>2</sub>, актуальним стає питання більш відповідального використання цифрових сервісів. Зменшенню негативного впливу можуть сприяти скорочення кількості непотрібних повідомлень, відмова від масових розсилок без реальної потреби, використання посилок замість великих вкладень, а також регулярне очищення електронних поштових скриньок і хмарних сховищ. Навіть такі прості дії здатні знизити навантаження на серверну інфраструктуру та скоротити споживання енергії [4].

Отже, цифрові технології мають подвійний вплив на навколишнє середовище. З одного боку, вони сприяють підвищенню ефективності використання ресурсів та розвитку енергозберігаючих рішень, а з іншого – зумовлюють зростання енергоспоживання та викидів парникових газів. У сучасних умовах важливо не лише впроваджувати інноваційні цифрові технології, але й формувати культуру відповідального цифрового споживання. Поєднання технологічного розвитку з екологічною свідомістю є необхідною умовою досягнення цілей сталого розвитку та зменшення негативного впливу цифровізації на довкілля.

#### Список літератури:

1. Panchal B.Y. Survey on Carbon Dioxide Emissions Through Email Conversion / B.Y. Panchal, K.D. Vachhrajani, A.P. Ganatra, V. Thakkar et al. // SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. – 2023. Vol. 15(01). – P. 122-127.
2. Chopra H. Carbon Footprint as Climate Change Disclosure: Opportunities for Performance Improvement / H. Chopra, P. Goel, T. Shimrah et al. // Vantage: Journal of Thematic Analysis. – 2020. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 161-166.
3. Горохова Т.В. Вплив розвитку цифрових технологій на поведінку споживачів / Т.В. Горохова // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2021. – С. 45-51.
4. Бобров Є.А. Вплив цифрових технологій в секторах попиту та пропозицій енергії / Є.А. Бобров // Вчені записки Університету «КРОК». – 2018. – №4 (52). – С. 222-230. .

УДК 662.611:66.074.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКОСТІ ВИКИДІВ ОКСИДІВ ВУГЛЕЦЮ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЛЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СКЛАДУ ПАЛИВА

Копанцев В.П., к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

kopantsev.vadym@iit.kpi.ua

Науковий керівник: PhD, ас. Беднарська І.С.

Енергетика відповідає приблизно за третину глобальних викидів діоксиду вуглецю. На тепловій енергетиці, яка залежить від викопного палива, лежить значна частка цієї відповідальності. Теплоенергетичні установки є вагомими джерелами антропогенного впливу на довкілля, а проблема скорочення викидів парникових газів та продуктів неповного згоряння палива набуває дедалі більшої актуальності в умовах посилення екологічних вимог і переходу до принципів сталого розвитку.

Відповідно до Директиви Європейського Парламенту і Ради 2010/75/ЄС про промислові викиди [1], одним із ключових напрямів екологічної політики є запобігання та зменшення забруднення довкілля шляхом контролю викидів від установок згоряння палива. Великі установки згоряння є значними джерелами забруднення атмосферного повітря, що потребують впровадження жорсткіших екологічних норм і найкращих доступних технологій для зниження негативного впливу на довкілля та здоров'я людини. Визначення показників емісії CO<sub>2</sub> залежно від складу вугілля є необхідною передумовою для науково обґрунтованого управління їх екологічністю. Навіть при однаковій тепловій потужності установки різні марки вугілля зумовлюють суттєво відмінні валові викиди. Це підкреслює, що вибір виду палива є одним із ключових інструментів зниження вуглецевого сліду ТЕС.

Мета роботи – визначити показники емісії CO<sub>2</sub> для основних марок вугілля, що використовуються на українських теплових електростанціях, та оцінити вплив складу палива на валові викиди.

Показник емісії вуглецю розраховується за формулою [2]:

$$k_C = \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r}, \quad (1)$$

де  $C^r$  – масовий вміст вуглецю на робочу масу вугілля, %;  $\varepsilon_C$  – ступінь окислення вуглецю палива (3);  $Q_i^r$  – нижча теплота згоряння (вугілля), МДж/кг

Показник емісії діоксиду вуглецю розраховується в перерахунку через їх молекулярні маси ( $M(\text{CO}_2) \approx 44$  кг/кмоль,  $M(\text{C}) \approx 12$  кг/кмоль) [2]:

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{M(\text{CO}_2)}{M(\text{C})} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \varepsilon_C = \frac{44}{12} \cdot k_C \cdot \varepsilon_C. \quad (2)$$

Ступінь окислення вуглецю визначає повноту його згоряння і залежить від режиму роботи печі та характеристик палива. Приймає значення близькі до 1

при повному згорянні та зменшується при неповному. Розраховується за формулою [2]:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left( a_{\text{внн}} \cdot \frac{\Gamma_{\text{внн}}}{100 - \Gamma_{\text{внн}}} + (1 - a_{\text{внн}}) \cdot \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} \right). \quad (3)$$

Дослідження охоплюватиме основні марки вугілля, що використовуються на теплових електростанціях України: антрацитовий штиб (АШ), пісне вугілля (ТР/ПР), донецьке газове (ГР), донецьке довгополуменеве (ДР), львівсько-волинське (ЛВ/ГР) та олександрійське буре (Б1Р) [2, 3].

Для розрахунку враховуємо наявність леткої золи (її частка  $a_{\text{внн}} = 0,8$ ), горючих речовин у ній (їх масовий вміст  $\Gamma_{\text{внн}} = 11,4\%$ ) та шлаку (їх масовий вміст  $\Gamma_{\text{шл}} = 11,4\%$ ) [2, 4].

Отже, показники емісії вуглецю та його діоксиду, зведені до табл. 1 та проілюстровані на рис. 1.

Таблиця 1

Показники емісії різних марок вугілля

Вугілля	Марка	Вміст вуглецю на робочу масу, %	Ступінь окислення вуглецю	Показник емісії вуглецю, г/ГДж	Показник емісії діоксиду вуглецю, г/ГДж
		$C^r$	$\varepsilon_C$	$k_C$	$k_{CO_2}$
Антрацитовий штиб	АШ	64,52	0,9501	28314	98641
Пісне вугілля	ТР	66,75	0,9518	28392	99087
Донецьке газове	ГР	60,75	0,9471	27719	96255
Донецьке довгополуменеве	ДР	56,63	0,9432	27046	93536
Львівсько-волинське	ЛВ/ГР	55,65	0,9422	25626	88531
Олександрійське буре	Б1Р	37,13	0,9134	20119	67379

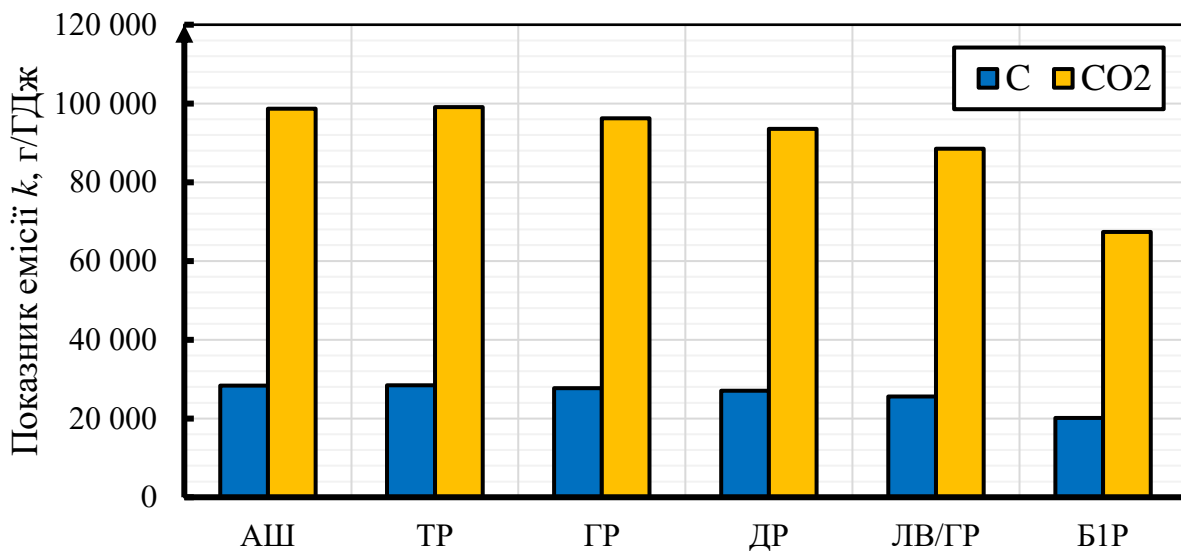


Рисунок 1 – Показники емісії вуглецю та його діоксиду різних марок вугілля

Серед розглянутих марок найвищі значення  $k_{CO_2}$  характерні для пісного вугілля та антрацитового штибу – понад 98 000 – 99 000 г/ГДж, тоді як олександрійське буре (Б1Р) демонструє майже на третину менший показник внаслідок низького вмісту вуглецю на робочу масу та меншої теплоти згоряння. Разом із тим, принципово важливим є те, що навіть незначне зменшення ступеня окислення вуглецю  $\epsilon_C$  чи питомого показника емісії  $k_C$  помітно скорочує валовий викид  $CO_2$ : зниження  $\epsilon_C$  всього на 0,005 (наприклад, з 0,952 до 0,947 – перехід від пісного до газового вугілля) зменшує  $k_{CO_2}$  на приблизно 2 800 г/ГДж, що в перерахунку на річне споживання мільйонів тонн палива становить тисячі тонн  $CO_2$ .

Це підкреслює практичну цінність заходів, спрямованих на підвищення повноти згоряння, – оптимізації режиму горіння, рециркуляції димових газів, ступеневої подачі повітря, – оскільки навіть їхній частковий ефект дає вимірюваний екологічний результат в масштабах реального енергоблоку. Отримані дані дозволяють раціональніше оцінювати екологічні показники різних марок вугілля для поліпшення режимів роботи теплоенергетичних установок.

#### Список літератури:

1. Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання та контролю забруднення). – Офіційний вісник Європейського Союзу, L 334, 17.12.2010. – С. 17-119.
2. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ, 2002. – 120 с.
3. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. Т. 1 / за ред. В.С. Білецького. – Донецьк: Донбас, 2004. – 640 с.
4. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. Т. 2 / за ред. В.С. Білецького. – Донецьк: Донбас, 2007. – 652 с.
5. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. Т. 3 / за ред. В.С. Білецького. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 644 с.

УДК 621.181.5:662.92:621.311

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАЛОВИТРАТНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАЛЬНИКОВОЇ СИСТЕМИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

К.т.н. Романова К.О., У Цзунянь

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

romanova.kateryna@iit.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н. Романова К.О.

Через значне зростання вартості енергетичних ресурсів та необхідності підвищення ефективності роботи теплоенергетичного обладнання особливої актуальності набуває модернізація існуючих котельних агрегатів без значних капіталовкладень. Значна частина водогрійних котлів, що експлуатуються на теплоелектроцентралях України, була введена в роботу декілька десятиліть тому та характеризується високими втратами теплоти, підвищеними питомими витратами палива й недостатньою ефективністю процесу горіння. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення енергетичної ефективності є вдосконалення паливних систем та оптимізація режимів спалювання природного газу [1].

З метою дослідження можливостей підвищення енергетичної ефективності котельного агрегату ПТВМ-180 шляхом маловитратної модернізації паливної системи та оптимізації аеродинамічних характеристик повітряного потоку було виконано аналіз теплотехнічних показників котла, проведено оцінку втрат теплоти та досліджено вплив конструктивних параметрів паливника на умови формування факела і теплову ефективність роботи агрегату.

Об'єктом дослідження є водогрійний котел ПТВМ-180 теплопродуктивністю 180 Гкал/год, обладнаний газомазутними паливниками типу РГМП-9. Котел призначений для покриття пікових теплових навантажень у системах централізованого теплопостачання та працює на природному газі або резервному паливі. Аналіз експлуатаційних характеристик котла показав, що основними причинами зниження його економічності є підвищені втрати теплоти з відхідними газами, недосконалість процесу змішування палива з повітрям та нерівномірний розподіл температур у топковій камері.

Також, було використано результати експериментальних вимірювань та математичного моделювання процесів горіння у середовищі SolidWorks Flow Simulation. Під час досліджень визначалися температура відхідних газів, витрата природного газу, коефіцієнт надлишку повітря, температура мережної води до та після котла, а також теплове навантаження агрегату. Розрахунок енергетичних показників здійснювався методом зворотного теплового балансу відповідно до нормативних методик [2].

Важливим етапом дослідження стало математичне моделювання процесів руху газоповітряних потоків у топковому просторі котла (рис.1 і рис.2). Просторова модель топкової камери дозволила оцінити вплив конструкції

пальникових пристроїв на структуру потоку, характер розподілу температур та умови формування факела. Результати моделювання показали, що існуюча конструкція пальників РГМП-9 не забезпечує достатньо рівномірного змішування газу з повітрям.

У ході дослідження встановлено, що одним із найбільш ефективних способів підвищення економічності роботи котла є оптимізація структури повітряного потоку в пальниковому пристрої. Зміна кута закрутки повітря та вдосконалення геометрії каналів подачі повітря дозволяють забезпечити більш інтенсивне перемішування природного газу з окисником, стабілізувати процес горіння та зменшити нерівномірність температурного поля у факелі.

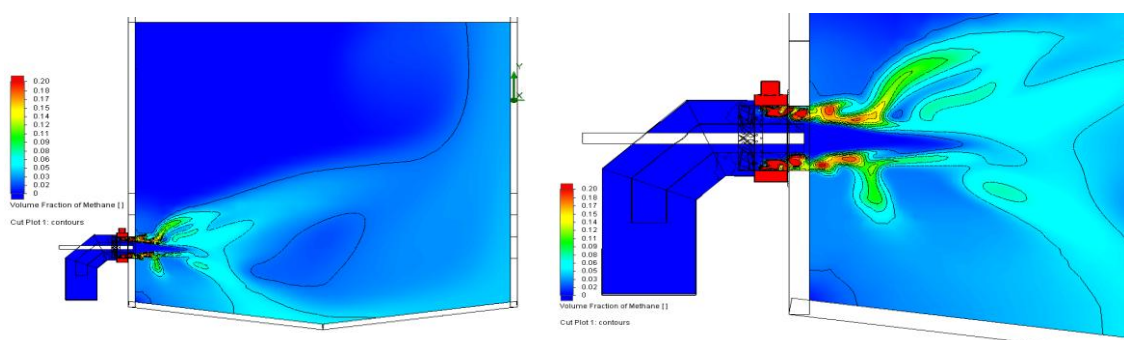


Рисунок 1 – Розподіл концентрацій газу у топці котла при роботі пальника штатного типу у повздовжньому розрізі

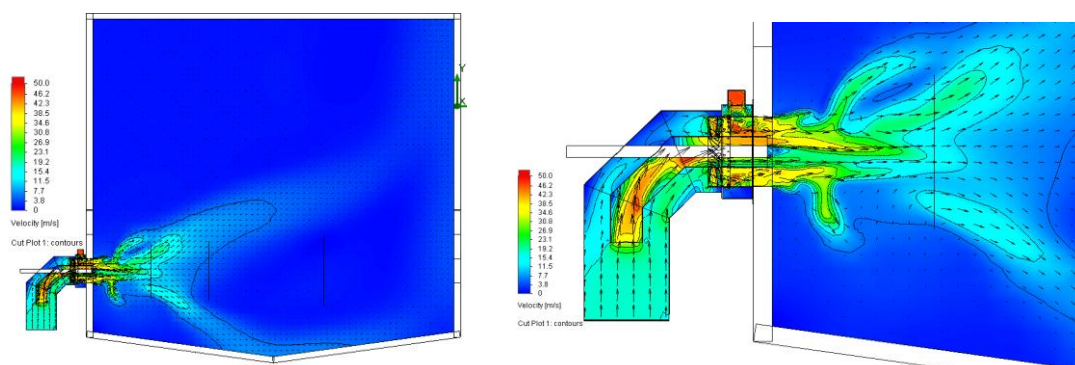


Рисунок 2 – Розподіл швидкостей газоповітряної суміші у топці котла при роботі пальника штатного типу у повздовжньому розрізі

Аналіз результатів моделювання показує, що максимальні концентрації природного газу спостерігаються безпосередньо у зоні виходу паливного потоку з пальника. У центральній частині факела формуються локальні області з підвищеною концентрацією газу, тоді як у периферійних зонах топкової камери суміш є значно збідненою. Такий нерівномірний розподіл свідчить про недостатню інтенсивність перемішування газу з повітрям та формування неоднорідного факела.

З аналізу поля швидкостей видно, що найбільші швидкості потоку формуються у зоні виходу суміші з пальникового пристрою. Подальше поширення потоку супроводжується поступовим зниженням швидкості та утворенням зон рециркуляції у верхній частині факела. Нерівномірність швидкісного поля свідчить про наявність аеродинамічних втрат та недостатньо

ефективну організацію руху повітря у топковій камері.

Отримані результати підтверджують доцільність модернізації пальникової системи шляхом оптимізації закрутки повітряного потоку та покращення умов змішування газу з окисником. Завдяки оптимізації аеродинамічних характеристик пальникового пристрою забезпечується покращення процесу горіння, зменшення втрат теплоти та підвищення ККД котельного агрегату без значних капітальних витрат [3–5].

#### Список літератури:

1. Басок Б.І. Підвищення енергоефективності теплоенергетичних установок / Б.І. Басок, М.В. Новіцький // Промислова теплотехніка. – 2021. – Т. 43, № 4. – С. 15-24.
2. Методичні вказівки з розрахунку звітних техніко-економічних показників електростанцій про теплову економічність устаткування ГКД 34.09.103-96. – Київ, 1996. – 185 с.
3. Капустянський А.О. Сучасні підходи до модернізації котельного обладнання / А.О. Капустянський // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 3. – С. 41-48.
4. SolidWorks Flow Simulation 2023 Technical Reference. – Dassault Systèmes, 2023. – 420 p.
5. Крижанівський Ю.В. Структура і розрахунок газового факелу / Ю.В. Крижанівський, В.Н. Крижанівський. – Київ: Освіта України, 2012. – 96 с.

УДК 662.61:628.512

## АНАЛІЗ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВУГІЛЛЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕХНОЛОГІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ГОРІННЯ

Шапаренко Є.А., PhD, ас. Беднарська І.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ  
zenasaparenko@gmail.com*

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Сучасний стан енергетичного сектору України в умовах дефіциту газоподібних енергоносіїв вимагає максимальної ефективності при використанні власних паливних ресурсів, серед яких вугілля займає домінуючу роль. Однак інтенсифікація спалювання твердого палива на теплових електростанціях неминуче призводить до зростання екологічного навантаження на атмосферне повітря. Одним із найбільш небезпечних компонентів димових газів, які утворюються при спалюванні вугілля, є оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), які мають високу токсичність, сприяють руйнуванню озонового шару та ініціюють утворення фотохімічного смогу [1]. На відміну від рідких та газоподібних енергоносіїв, вугілля є складним гетерогенним паливом, що вимагає специфічних підходів до організації процесу спалювання. Проблема полягає в тому, що на більшості вітчизняних ТЕС відсутні високовартісні установки селективного каталітичного очищення [2]. У таких умовах єдиним дієвим інструментом забезпечення екологічних нормативів стає впровадження технологічних (первинних) методів пригнічення азотистих сполук безпосередньо в топочному просторі котла.

При термічному розкладанні та горінні вугільного пилу генерація  $\text{NO}_x$  відбувається за трьома паралельними шляхами. Термічний механізм активується при температурах факела понад  $1500^\circ\text{C}$  за рахунок окислення атмосферного азоту. Швидкий механізм реалізується в тонкому шарі фронту полум'я за участю вуглеводневих радикалів. Проте ключовою особливістю саме вугілля є домінування паливного механізму. Азот, що зв'язаний в органічній структурі вугілля, при нагріванні переходить у леткі сполуки ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ), які в умовах надлишку кисню миттєво перетворюються на оксиди. Дослідження показують, що частка паливних  $\text{NO}_x$  при спалюванні енергетичного вугілля може сягати 70–80% від загальної емісії. Саме тому стратегія боротьби з викидами при спалюванні твердого палива має базуватися на створенні відновлювальних зон у топці, що суттєво відрізняє цей процес від методів, що використовуються для мазуту чи газу.

Об'єктом даного аналізу є фізико-хімічні процеси формування шкідливих викидів у котлоагрегаті при спалюванні антрацитового штибу. Метою роботи є кількісне порівняння ефективності різних конфігурацій організації топочного процесу для зниження виходу азотистих сполук. Розрахунки базуються на галузевому стандарті ГКД 34.02.305-2002, який дозволяє оцінити питомий

вихід  $\text{NO}_x$  (г/ГДж) з урахуванням конструктивних особливостей пальників, надлишку повітря та температурного режиму топки [3].

У ході дослідження було проаналізовано п'ять базових технологічних сценаріїв [4]:

1. Традиційне смолоскипне спалювання (базовий рівень) – характеризується високим температурним ядром та неконтрольованим змішуванням палива з повітрям.

2. Технологія ступеневого підведення повітря (OFA) – передбачає подачу частини повітря вище основної зони горіння, що створює відновлювальне середовище.

3. Застосування низькотоксичних пальників (LNB) – спеціальна аеродинаміка яких забезпечує розділення потоків на збагачені та збіднені паливом зони.

4. Низькотемпературне вихрове горіння – інноваційний метод, що базується на багаторазовій циркуляції палива в топці при знижених температурах горіння.

5. Гібридна схема (LNB + OFA) – інтегрований підхід, що поєднує модернізацію пальникових пристроїв з режимною наладкою повітряних потоків.

Розрахункові показники емісії ( $K_{\text{NO}_x}$ , г/ГДж) дозволяють провести глибокий порівняльний аналіз. Встановлено, що при факельному спалюванні концентрація  $\text{NO}_x$  є найвищою через інтенсивний вихід летких сполук азоту в зоні високих температур [5]. Отримані дані зведені до діаграми, яка зображена на рис. 1.

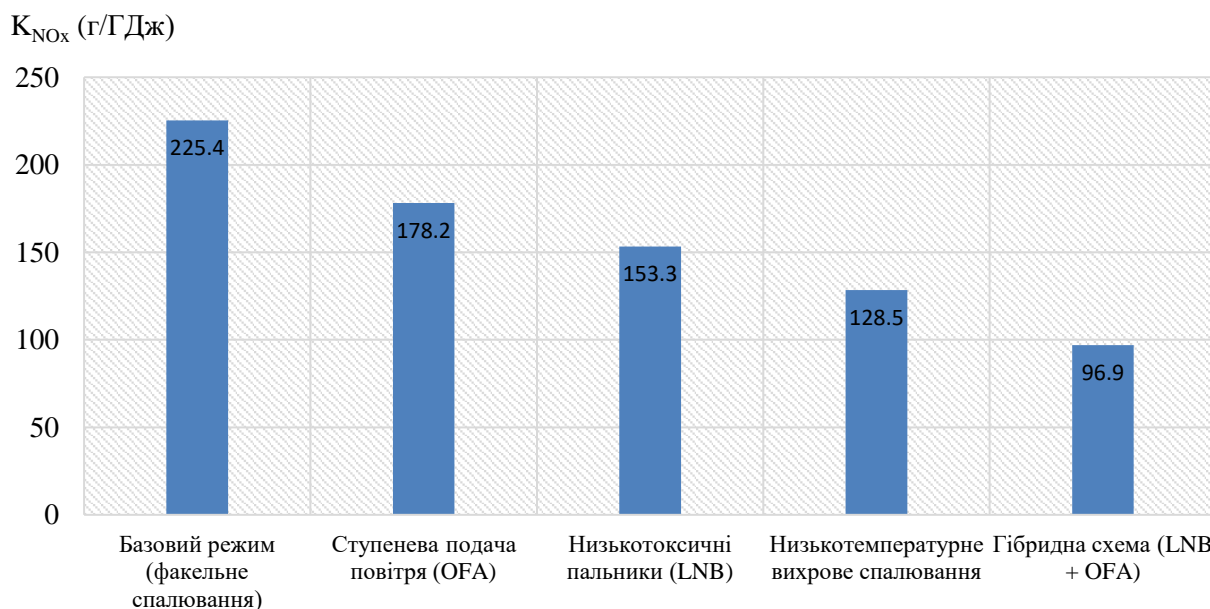


Рисунок 1 – Показник емісії оксидів азоту при різних технологіях спалювання вугілля

Найменш ефективним серед одиночних заходів пригнічення емісії  $\text{NO}_x$  є ступенева подача повітря, яка забезпечує зниження на 21 % порівняно з

базовим рівнем. Найвищу ефективність продемонструвала гібридна схема, що забезпечує зниження емісії на 57 %. Це пояснюється синергією методів: LNB обмежує утворення паливних  $\text{NO}_x$  на початковому етапі факела, а OFA мінімізує термічну генерацію у верхній частині топки [6].

Отримані результати дозволяють обґрунтовано підходити до розробки проектів модернізації діючих вугільних енергоблоків. Це дає змогу уникнути капіталомістких витрат на будівництво зовнішніх систем очищення, зосередившись на оптимізації внутрішньотопкових процесів, що є економічно виправданим для енергетики України в умовах післявоєнного відновлення. Проведене дослідження підтверджує, що вибір технології організації горіння є першочерговим фактором впливу на екологічні показники ТЕС. Найбільш перспективним для вугільних котлів є впровадження комбінованих методів спалювання.

### Список літератури:

1. Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. – Київ: Мінекоресурсів України, 2001. – 156 с.
2. Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання та контролю забруднення). – Офіційний вісник Європейського Союзу, L 334, 17.12.2010. – С. 17-119.
3. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ: ОЕП "ГРІФРЕ", 2002. – 42 с.
4. Шелешей Т. Порівняльний аналіз рівня емісії оксидів азоту при спалюванні антрацитового штибу на різних енергетичних установках / Т. Шелешей, І. Беднарська, Л. Майер, В. Юрчук // Молодий вчений. – 2020. – № 5 (81). – С. 129-132.
5. Усов І.Л. Підвищення екологічної ефективності теплових електростанцій: аналіз технологій очищення викидів та підходів до модернізації / І.Л. Усов, Т.В. Шелешей // Вчені записки. – 2025. – Т. 36(75), №6(1). – С.141-148.
6. Sheleshey T. Quantitative indicators of nitrogen oxides when used at different energy installations / T. Sheleshey, I. Bednarska, A. Kutsa, K. Tsyhanov, I. Olymenko, Y. Apostol // In Sworld-US Conference proceedings (2023, March). – 2023. – No. usc17-01. – P. 12-14.

УДК 620.9:502/504:005.745

## АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЯК СТРАТЕГІЧНОГО НАПРЯМКУ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Семенюк О.П., Ганькова В.А.

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро*  
gunko\_o@365.dnu.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Гунько О.Ю.

Енергозбереження сьогодні є одним із ключових напрямів сталого розвитку, оскільки енергетичний сектор залишається одним із найбільших джерел антропогенних викидів та екологічного навантаження на довкілля. Зростання споживання енергії, залежність від викопних ресурсів та пов'язані з цим викиди парникових газів формують комплекс екологічних ризиків, що впливають на кліматичну стабільність, якість повітря, стан водних ресурсів і біорізноманіття. У цьому контексті енергозбереження виступає не лише економічним, а й екологічним інструментом мінімізації негативного впливу енергетики на довкілля [1-3].

Актуальність теми зумовлена кількома чинниками:

- кліматичні зміни – енергетика формує близько 73 % глобальних викидів парникових газів, тому скорочення енергоспоживання є критичним для виконання міжнародних кліматичних зобов'язань [2];
- виснаження природних ресурсів – традиційні джерела енергії мають обмежений характер, а їх видобуток супроводжується деградацією екосистем [4];
- екологічні ризики енергетичної інфраструктури – забруднення повітря, ґрунтів, водних ресурсів, утворення відходів, теплове забруднення [3];
- потреба у модернізації енергетичного сектору країни – підвищення енергоефективності є ключовим елементом екологічної безпеки та економічної стійкості держави [1].

Аналіз екологічних аспектів енергозбереження дозволяє оцінити екологічне навантаження на навколишнє середовище та оптимізувати енергетичні процеси через скорочення споживання ресурсів та зменшення викидів. Енергозбереження сприяє зменшенню видобутку вугілля, нафти та газу, що знижує ризики деградації земель, забруднення водних об'єктів та руйнування природних ландшафтів [2, 4]. Кожен відсоток зниження енергоспоживання прямо корелює зі зменшенням викидів CO<sub>2</sub>. За даними Міжнародного енергетичного агентства, впровадження енергоефективних технологій може забезпечити до 40% скорочення глобальних викидів до 2050 року [2]. Менше споживання енергії означає менше спалювання палива, а отже – менше SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, твердих частинок та токсичних відходів. Це безпосередньо впливає на здоров'я населення та стан природних екосистем – зниження забруднення повітря та води. Підтримка розвитку відновлюваної енергетики та інтеграція відновлюваних джерел енергії, які мають значно

нижчий екологічний слід, веде до зменшення загального навантаження на енергосистему. Екологічна модернізація промисловості та будівель й використання сучасних технологій – теплоізоляції, рекуперації, енергоощадного обладнання – дозволяє зменшити енергоспоживання на 20-60 %, що є одним із найшвидших шляхів екологічного ефекту [1, 2]. Це робить енергоефективність ключовим елементом екологічної політики.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновки, що енергозбереження є стратегічним напрямом екологічної політики, який поєднує економічні, технологічні та природоохоронні аспекти. Енергоефективність дозволяє зменшити антропогенний вплив на довкілля, підвищити енергетичну безпеку та створює умови для переходу до низьковуглецевої економіки. Розвиток енергозбереження є не лише екологічною необхідністю, а й важливою умовою модернізації економіки, підвищення конкурентоспроможності в сфері відновлюваної енергетики та виконання міжнародних екологічних зобов'язань.

### **Список літератури:**

1. The Sustainable Development Goals Report 2023: Special edition. Towards a Rescue Plan for People and Planet. – United Nations, 2023. – 80 p.
2. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023: Analysis and Outlook. – Paris: IEA, 2023. – 126 p.
3. European Environment Agency. Environmental Impacts of Energy Production and Consumption. – EEA Report, 2022. – 58 p.
4. United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook 6. – Cambridge University Press, 2019. – 32 p.

УДК 628.52: 504.06

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКОСТІ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ $\text{NO}_x$ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРИ СПАЛЮВАННІ МАЗУТУ

Гранішевська А.Р., Сапон В.О., PhD, ас. Беднарська І.С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ  
granishevskaya27@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Однією з найгостріших екологічних проблем сучасної теплоенергетики є забруднення атмосфери оксидами азоту ( $\text{NO}_x$ ), що утворюються під час спалювання рідкого палива, зокрема мазуту. Відповідно до вимог Директиви ЄС 2010/75/EU про промислові викиди [1] та зобов'язань України перед Європейським енергетичним співтовариством [2], підприємства теплоенергетики зобов'язані забезпечити зниження емісії забруднювальних речовин до нормативних рівнів. Оксиди азоту є одними з ключових поллютантів, що призводять до утворення фотохімічного смогу, кислотних дощів та негативно впливають на здоров'я населення [3].

При спалюванні мазуту утворення  $\text{NO}_x$  обумовлено як азотом, що міститься в паливі, так і термічним окисненням молекулярного азоту повітря при високих температурах у топці [4]. Рівень викидів суттєво залежить від застосованих первинних (режимно-технологічних) заходів, а також від наявності та типу вторинних систем очищення димових газів від  $\text{NO}_x$ . Серед сучасних технологій вторинного очищення найбільш поширеними є: селективне некаталітичне відновлення (СНКВ), селективне каталітичне відновлення (СКВ), адсорбція активованим вугіллям (АВ) та комбінований каталітичний процес DESONOX–SNOX [5].

Метою даного дослідження є розрахунок та порівняльний аналіз валових викидів оксидів азоту при спалюванні високосірчистого мазуту марки 40 в енергоблоці паропродуктивністю 950 т/год залежно від обраної технології азотоочищення.

Узагальнений показник емісії оксидів азоту  $k_{\text{NO}_x}$  з урахуванням заходів скорочення викиду розраховується за формулою [6]:

$$k_{\text{NO}_x} = (k_{\text{NO}_x})_0 \cdot f_n \cdot (1 - \eta_I) \cdot (1 - \eta_{II}\beta), \quad \text{г/ГДж}, \quad (1)$$

де  $(k_{\text{NO}_x})_0$  – показник емісії без урахування заходів, г/ГДж;  $f_n$  – ступінь зменшення викиду  $\text{NO}_x$  при роботі на низькому навантаженні;  $\eta_I$  – ефективність первинних заходів;  $\eta_{II}$  – ефективність азотоочисної установки;  $\beta$  – коефіцієнт її роботи.

Валовий викид оксидів азоту  $E_{\text{NO}_x}$  за звітний період:

$$E_{\text{NO}_x} = 10^{-6} \cdot k_{\text{NO}_x} \cdot Q_{\Gamma}^i \cdot B, \quad \text{т}. \quad (2)$$

Базовий показник без вторинного очищення:  $(k_{\text{NO}_x})_0 = 200$  г/ГДж; емпіричний коефіцієнт  $z = 1,25$ ;  $\eta_I = 0,40$  (ступенева подача повітря +

рециркуляція димових газів).

За формулами (1) та (2) розраховано показники  $k_{NO_x}$  та  $E_{NO_x}$  для чотирьох технологій вторинного очищення. Параметри установок ( $\eta_{II}$  та  $\beta$ ) взято з табл. Д.8 нормативного документу [6].

Найвищий рівень залишкових викидів спостерігається при використанні СНКВ – 128,4 т, що вдвічі менше за базовий рівень. Технологія DESONOX–SNOX забезпечує найкращий результат: валовий викид знижується до 15,1 т, що складає лише 5,9 % від базового рівня.

На рис. 1 представлена діаграма порівняння валових викидів оксидів азоту  $E_{NO_x}$  для кожного з досліджених варіантів, включаючи базовий (без вторинного очищення). Діаграма наочно ілюструє ефективність різних технологій у зниженні викидів.

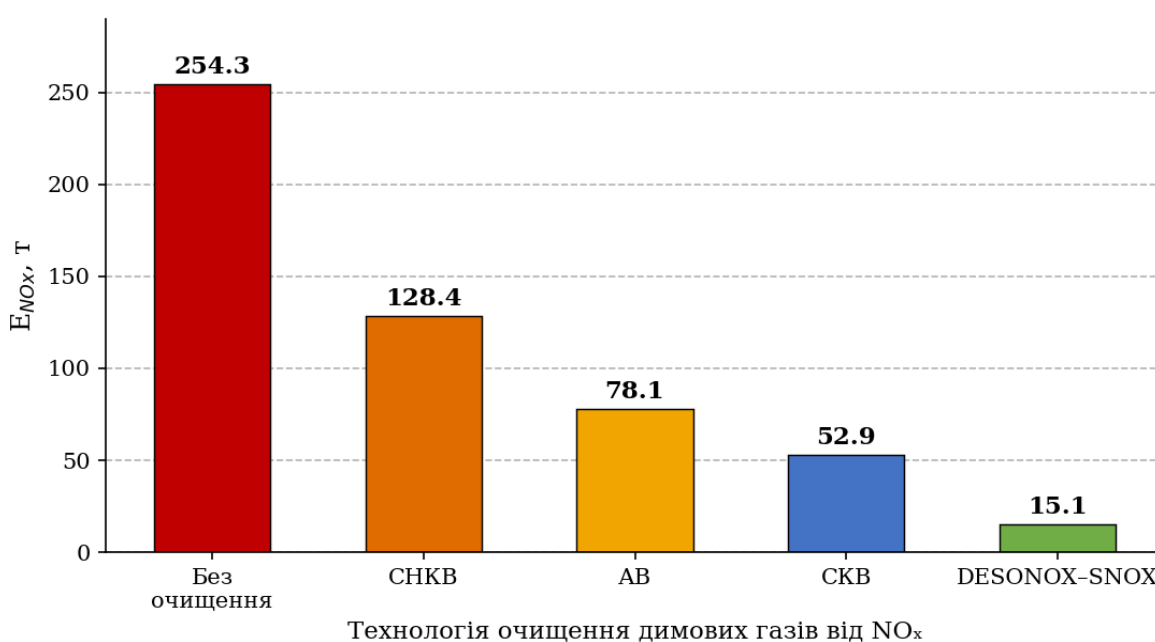


Рисунок 1 – Порівняння валових викидів оксидів азоту  $E_{NO_x}$ , т, залежно від технології очищення димових газів

Діаграма ілюструє різку нерівномірність у здатності технологій знижувати викиди. Перехід від СНКВ до DESONOX–SNOX забезпечує додаткове скорочення у 8,5 разів. Навіть технологія СНКВ, що вважається найменш ефективною серед вторинних методів, дозволяє вдвічі зменшити викиди порівняно з відсутністю вторинного очищення. Вибір між технологіями слід здійснювати з урахуванням не лише екологічних показників, але й капітальних та експлуатаційних витрат [3].

**Висновки.** Проведені розрахунки підтвердили суттєву залежність рівня викидів NO<sub>x</sub> від обраної технології вторинного очищення димових газів. При спалюванні мазуту марки 40 з базовим валовим викидом 254,3 т застосування СНКВ знижує його до 128,4 т (- 49,5 %), АВ – до 78,1 т (- 69,3 %), СКВ – до 52,9 т (- 79,2 %), а DESONOX–SNOX – до 15,1 т (- 94,1 %). Найвищу ефективність демонструє каталітична технологія DESONOX–SNOX, яка

забезпечує одночасне очищення від  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_2$ , що є особливо актуальним при спалюванні високосірчастого мазуту. Показник емісії  $k_{\text{NO}_x}$  є інформативним критерієм для вибору оптимального типу азотоочисної установки з урахуванням як екологічних нормативів, так і економічної доцільності.

### Список літератури:

1. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) [Electronic resource] // Official Journal of the European Union. – 2010. – L 334, 17.12.2010. – pp. 17–119. – Access mode: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075\\_](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075_) (last access: 03.05.2026). – Title from the screen.
2. Газізуллін І. Зменшення викидів у тепловій електроенергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства: зелена книга / І. Газізуллін, Л. Лозовий, О. Івахно. – Київ: Оптима, 2011. – 43 с.
3. Skalska K. Trends in  $\text{NO}_x$  abatement: A review / K. Skalska, J.S. Miller, S. Ledakowicz // Science of The Total Environment. – 2010. – Vol. 408, Iss. 19. – P. 3976–3989.
4. Bowman C.T. Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation. / C.T. Bowman // Symposium (International) on Combustion. – 1992. – Vol. 24, Iss. 1. – P. 859-878.
5. Forzatti P. Present status and perspectives in de- $\text{NO}_x$  SCR catalysis / P. Forzatti // Applied Catalysis A: General. – 2001. – Vol. 222, Iss. 1-2. – P. 221-236.
6. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ, 2002. – 120 с.

УДК 502.3 (075)

## СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Царенко В.В., Сікорський А.А.

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро*  
gunko\_o@365.dnu.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Гунько О.Ю.

Антропогенний вплив на водні екосистеми зростає внаслідок індустріалізації, урбанізації та інтенсивного сільського господарства. Забруднення поверхневих і підземних вод, евтрофікація, накопичення важких металів, мікропластику та фармацевтичних залишків формують комплекс екологічних загроз [1, 2]. У цих умовах захист водного середовища стає ключовим інструментом забезпечення екологічної безпеки та сталого водокористування.

Проблема захисту водних ресурсів є критично важливою через зростання обсягів промислових і побутових стоків; появу нових типів забруднювачів (ендокринні руйнівники, наноматеріали, мікропластик); деградацію водних екосистем та втрату біорізноманіття; необхідність адаптації водного сектору до кліматичних змін; потребу України у модернізації систем водоочищення та моніторингу [1, 2].

Сучасні технології очищення, моніторингу та відновлення водного середовища – це комплекс інженерних, біотехнологічних, природоорієнтованих та цифрових рішень, спрямованих на зменшення забруднення, відновлення водних екосистем і запобігання негативному впливу людської діяльності. Системи, методи та інструменти, які забезпечують очищення, моніторинг, відновлення та збереження водних ресурсів, застосовуються для поверхневих, підземних, морських та штучних водойм.

Розглянемо основні групи методів захисту водного середовища [1-4]:

1. Інженерні технології очищення води – це класичні та сучасні методи, що фізично, хімічно або біологічно видаляють забруднювачі, забезпечують глибоке очищення і широко застосовуються у промисловості та комунальному секторі: адсорбція – використання активованого вугілля, цеолітів, графенових матеріалів; коагуляція та флокуляція – видалення завислих частинок; окиснювальні процеси – озонування, фотокаталітичне очищення, пероксидні методи; мембранні процеси – ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос.

2. Біотехнологічні методи використовують мікроорганізми, водорості та біоплівки для розкладання забруднювачів – найбільш ефективні для органічних речовин, азоту, фосфору та біогенних елементів: аеробні та анаеробні біореактори; мембранні біореактори; біофільтри та біоплівкові системи; біоремедіація та фіторемедіація (очищення за допомогою рослин).

3. Природоорієнтовані рішення – технології, що імітують природні

процеси самоочищення, є екологічними, енергоефективними та довговічними системами захисту водного середовища: біоплато та біоінженерні системи; конструйовані водно-болотні угіддя; фіторемедіація берегових зон; відновлення русел та заплав.

4. Цифрові технології моніторингу дозволяють контролювати стан вод у реальному часі, що підвищує точність, швидкість реагування та ефективність управління водним сектором: сенсорні мережі та IoT-платформи; супутниковий моніторинг; моделі прогнозування забруднення на основі нейронних мереж; автоматизовані системи раннього попередження.

5. Технології відновлення водних екосистем спрямовані на повернення природного стану водоймам: аерація та біоманіпуляція; видалення мулу та токсичних відкладень; відновлення рослинності; реінтродукція видів; біоінженерні конструкції для берегозахисту.

Таким чином, сучасні технології захисту водного середовища формують багаторівневу систему, що включає інженерні, біотехнологічні, природоорієнтовані, цифрові та екосистемні підходи до очищення, моніторингу та відновлення водного середовища; сприяють поверненню природних функцій водоймам, підвищенню їх стійкості до антропогенних навантажень, покращенню екологічного стану водних ресурсів у довгостроковій перспективі. Найвищу ефективність забезпечує інтегрований підхід, що поєднує інженерні технології для глибокого очищення, біотехнології для стабільної роботи системи, природоорієнтовані рішення для екологічної рівноваги та цифрові інструменти для моніторингу й управління. Комплексне застосування дозволяє значно зменшити антропогенне навантаження, підвищити якість водних ресурсів та забезпечити екологічну безпеку. Для України впровадження сучасних методів захисту водного середовища є стратегічним завданням, що сприяє екологічній безпеці, адаптації до кліматичних змін та виконанню міжнародних природоохоронних зобов'язань [5, 6].

#### Список літератури:

1. Степова О.В. Технології захисту водного середовища. навч. посіб. / О.В. Степова, Г.Г. Трохименко. – Полтава, 2022. – 306 с.
2. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 2. Методи очищення стічних вод: підручник / В.Г. Петрук [та ін.]. – Херсон, 2019. – 298 с.
3. Біляєв М.М. Комп'ютерне моделювання процесів біологічної очистки стічних вод: монографія / М.М. Біляєв [та ін.]. – Дніпро: Журфонд, 2023. – 186 с.
4. Biliaiev M.M. 3D Modeling of Biological Wastewater Treatment in Aeration Tank / M.M. Biliaiev, M.V. Lemesh, O.Y. Gunko, V.O. Zadoia, P.V. Mashykhina, Z.M. Yakubovska // Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ. – 2020. – № 6 (90). – С. 5-14.
5. United Nations Environment Programme. Water Pollution and Water Quality Assessment. – UNEP Report, 2023. – 15 p.
6. The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO. – Paris, 2023. – 12 p.

УДК 620.97.004.18:621.18

## СТРАТЕГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КРИЗИ

Василенко В.А., PhD, ас. Беднарська І.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Сучасні виклики, з якими зіткнулася енергосистема України, вимагають перегляду підходів до функціонування об'єктів теплоенергетики, які ще експлуатуються. В умовах обмеженості паливних ресурсів та ризику тривалих блекаутів, підвищення енергоефективності перестає бути лише питанням економіки, перетворюючись на фактор національної безпеки та екологічної стійкості.

Аналіз світових тенденцій (згідно зі звітами Міжнародного енергетичного агентства – ІЕА [1]) свідчить, що інтеграція систем утилізації вторинних енергоресурсів (ВЕР) є обов'язковим елементом сучасних систем тепlopостачання. Європейський досвід (зокрема Польщі та Туреччини) підтверджує, що глибока утилізація тепла димових газів дозволяє не лише знизити споживання газу, а й стабілізувати роботу котельних установок у перехідних режимах [2]. В межах системного підходу, згідно з принципами енергоменеджменту (ISO 50001), використання ВЕР розглядається як інструмент створення децентралізованих «островів стійкості», що є особливо актуальним для об'єктів критичної інфраструктури [3, 4].

Впровадження конденсаційних утилізаторів забезпечує подвійний екологічний ефект [5, 6]: зниження теплового забруднення та скорочення викидів парникових газів. Температура продуктів згоряння після утилізатора знижується зі 160 °С до 40-50 °С. Це суттєво зменшує теплове навантаження на приземний шар атмосфери у межах житлової забудови. Пряма економія природного газу (на прикладі досліджуваної котельні потужністю 1 МВт – близько 3 м<sup>3</sup>/год) призводить до пропорційного зменшення викидів СО<sub>2</sub> та оксидів азоту (NO<sub>x</sub>). У масштабах тривалого опалювального сезону це робить значний внесок у виконання вимог щодо декарбонізації енергетики.

З точки зору безпеки, наявність системи утилізації тепла дозволяє котельні працювати довше на резервному запасі палива під час блекаутів [7]. Зниження питомої витрати газу на кожну вироблену 1 Гкал теплоти робить медичні та соціальні заклади більш автономними [8]. Системна модернізація існуючого парку котлів за допомогою встановлення рекуператорів є найбільш економічно доцільним шляхом адаптації інфраструктури до надзвичайних ситуацій.

Висновок. Комплексне використання вторинних енергоресурсів є необхідним кроком до створення екологічно безпечної та стійкої системи тепlopостачання. Поєднання міжнародного досвіду з вітчизняними реаліями

енергетичного кризи дозволяє трансформувати традиційні котельні у високоефективні вузли енергозабезпечення, що відповідають сучасним стандартам екології та надійності.

### **Список літератури:**

1. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2021: Market Report. – Paris: IEA, 2021. – 102 p.
2. Directive (EU) 2018/2002 of European Parliament and of Council of 11 December 2018 Directive 2012/27/EU on energy efficiency // Official Journal of the European Union. – 2018. – Vol. 61, L 328. – 234 p.
3. DSTU ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо використання (ISO 50001:2018, IDT). [Чинний від 2020-09-15]. Вид. офіц. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2020. 25 с.
4. Дешко В.І. Енергетичний менеджмент та енергоефективність: Навчальний посібник / В.І. Дешко, О.М. Шевченко. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 215 с.
5. Карп І.М. Використання теплоти відхідних газів теплогенеруючих установок / І.М. Карп, Є.Є. Нікітін // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2015. – № 4. – С. 12-19.
6. Sayegh M.A. Trends of European Research and Development in district heating technologies / M.A. Sayegh, J. Danielewicz, T. Nannou, M. Miniewicz, P. Jadwiszczak, K. Piekarska, H. Jouhara // Renewable i Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – P. 1183-1192.
7. Сухін Є.Є. Нетрадиційна енергетика та енергозбереження в умовах кризових ситуацій / Є.Є. Сухін // Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. – 2022. – № 5. – С. 34-40.
8. Terhan M. Energy and exergy analysis of natural gas-fired boiler in district heating system / M. Terhan, K. Comakli // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 104. – P. 165-174.

УДК 504:621:676

## ПЕРЕРОБКА ОДНОРАЗОВИХ СТАКАНІВ ЯК СПОСІБ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Пивовар Б.Д.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ*

bohdan.pyvovar-eko251@nung.edu.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Орфанова М.М.

У 2021 в Євросоюзі було прийнято закон про заборону одноразових пластикових виробів. Але на практиці, ці заборони не є настільки ефективними, наскільки могли би бути. Одна з екологічних проблем, на яку дійсно мало хто звертає увагу, це одноразові стакани. Пластикові або паперові стакани виробляються у величезній кількості, в залежності від потужності виробництва. Вони виробляються за максимальними виробничими можливостями, а не за фактичних чи наближених до фактичних потреб. А після використання одноразових стаканчиків з'являється питання їх переробки та утилізації.

Одноразові стакани не лише стрімо забруднюють навколишнє середовище, а й потребують енергетичних ресурсів для їх виготовлення.

Нами проведено соціологічне опитування про продаж гарячих напоїв в одноразових стаканах у торговельних організаціях м. Івано-Франківськ: Сімі, АТБ, Сільпо, КФС, АЗС Amic, АЗС Okko. Результати досліджень показали, що щоденна кількість відвідувачів закладів, які купують напої в одноразові стакани, досить висока і в окремих закладах може досягати понад 1000 відвідувачів. Але середній показник у закладах становить приблизно 500 відвідувачів, які купують напої в одноразові стакани. Тобто за рік в одному закладі для гарячих напоїв продають в середньому 182 500 одноразових стаканів. І всі ці стакани потрапляють на полігони побутових відходів, створюючи екологічну проблему збільшення об'єму сміттєзвалища. Всі види одноразових стаканів мають різний час розкладу у природніх умовах. Тому актуальним є їх переробка.

Розглянемо питання переробки одноразових стаканів з боку енергозбереження.

Відомо, що одна тона переробленого паперу може заощадити 4,100 кВт·год, а пластику – 5,700 кВт·год. Тобто, на переробку витрачається менше енергії, ніж на виготовлення, на 4,100 кВт·год [1].

Якщо середня маса паперового одноразового стакану становить 10 г або 0,01 кг, а пластикового стакану – 5 г або 0,005 кг, тоді одна тонна це 100 000 паперових або 200 000 пластикових стаканів [3].

Якщо середнє значення проданих напоїв в паперових стаканах 500 штук в одному закладі, то за рік це виходить 1825 кг паперу.

Проведемо розрахунки з найбільш реальними числами для закладів із невеликою кількістю відвідувачів. Нехай, заклад має 100 клієнтів, які купують

напій в одноразовому паперовому стакані щодня, або 365 стаканів щорічно. Але ці стакани можна переробляти, замість того, щоб вони потрапляли на смітник. Тоді, на одного клієнта припадає 365 стаканів на рік, а на 100 клієнтів 36500 стаканів. Загальна маса одноразових паперових стаканів у закладі із невеликою кількістю відвідувачів становитиме 0,365 т на рік. У перерахунку на електроенергію (у наближеному варіанті) це становить 1496 кВт-год зекономленої енергії з паперових одноразових стаканів [2].

**Висновки.** У часи сьогодення електроенергія це важливий енергетичний ресурс для України. Перероблюючи одноразові стакани можна не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, розглядаючи стакани як забруднювачі середовища, а й зекономити електроенергію.

А зекономлену енергію можна використати додатково для забезпечення житлових будинків електроенергією, що напевно є більш важливою потребою, ніж щодня купувати гарячий в одноразовому стакані [4]. В торговельних закладах можна організувати пункти збору одноразових стаканів, які будуть передаватись на переробку. Не менш важливою альтернативою одноразовим паперовим або пластиковим стаканам може стати, наприклад термодержки або, навіть, еко-стакани, які сьогодні малопоширені.

Коли людина використовує альтернативи одноразовим стаканам це не тільки зменшує забруднення середовища, а також економить енергетичні ресурси, які можна використати на більш важливі речі.

#### Список літератури:

1. Plastics – Facts & What the Numbers Mean. 230V [Electronic resource]. – Access mode: <https://townofcarrboro.org/2597/Plastics---Facts-What-the-Numbers-Mean> (last access: 10.04.2026). – Title from the screen.
2. Recycling Fast Facts. [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.nps.gov/bibe/planyourvisit/biberecycle\\_fastfacts.htm](https://www.nps.gov/bibe/planyourvisit/biberecycle_fastfacts.htm) (last access: 10.04.2026). – Title from the screen.
3. How Much Does a Paper Coffee Cup Weight? A Quick Guide. [Electronic resource]. – Access mode: <https://gmz.ltd/weight-of-a-paper-cup/> (last access: 10.04.2026). – Title from the screen.
4. Recycling Basics and Benefits. [Electronic resource] / EPA United States Environmental Protection Agency. – Access mode: <https://www.epa.gov/recycle/recycling-basics-and-benefits> (last access: 10.04.2026). – Title from the screen.

УДК 662.94:628.512

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРВИННИХ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ NO<sub>x</sub> ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ

Антонюк Г.М., PhD, ас. Беднарська І.С.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

antoniuk.hryhorii@iill.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

Енергетичний сектор України є одним із найбільших джерел забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Серед широкого спектра викидів теплових електростанцій та інших потужних установок, де відбувається процес спалювання органічного палива, особливу екологічну небезпеку становлять оксиди азоту (NO<sub>x</sub>). З огляду на посилення екологічних нормативів та євроінтеграційні процеси, завдання зниження обсягів викидів оксидів азоту до гранично допустимих значень є одним із пріоритетних напрямків модернізації існуючих генеруючих потужностей [1].

Метою даної роботи є детальне дослідження та математичне моделювання ефективності впровадження різних типів первинних заходів (внутрішньотопкових технологій) для скорочення обсягів емісії оксидів азоту на діючому вугільному енергоблоці.

Первинні заходи спрямовані безпосередньо на придушення фізико-хімічних механізмів утворення NO<sub>x</sub> безпосередньо у процесі горіння палива, на відміну від вторинних заходів (азотоочисних установок), які передбачають каталітичне або некаталітичне очищення вже утворених димових газів. Установки для хімічного очищення димових газів (селективного каталітичного чи некаталітичного відновлення) на досліджуваному енергоблоці відсутні, що робить впровадження первинних методів єдиним технічним інструментом екологічної оптимізації.

Як об'єкт дослідження розглядається потужний енергоблок, оснащений паровим котлом, який спроектовано для факельного спалювання вугілля з рідким шлаковидаленням. Оцінка екологічних показників роботи енергоблоку проводилась у два етапи [2]: спочатку визначався узагальнений показник емісії оксидів азоту  $k(\text{NO}_x)$ , після чого розраховувався валовий викид  $E(\text{NO}_x)$  у тонах за звітний період.

Генерація оксидів азоту при спалюванні органічного палива залежить від трьох головних факторів: максимальної температури в зоні активного горіння, часу перебування реагентів у цій високотемпературній зоні та локальної концентрації вільного кисню (O<sub>2</sub>). Усі розглянуті первинні заходи, наведені в табл. 1, базуються на керованому впливі саме на ці фізико-хімічні параметри.

У ході роботи було розраховано екологічні показники для базового режиму та 12 варіантів впровадження різних технологій (як відокремлено, так і в їхніх комбінаціях). Результати розрахунків зведено у табл. 1.

## Результати розрахунків

Тип первинних заходів	Показник емісії, $k_{NO_x}$ (Г/ГДж)	Валовий викид, $E_{NO_x}$ (Т)
Без заходів (базовий варіант)	193,34	4338,99
Малотоксичні пальники	154,67	3471,19
Ступенева подача повітря	135,34	3037,29
Подача третинного повітря	154,67	3471,19
Рециркуляція димових газів	174,00	3905,09
Трьохступенева подача повітря та палива	125,67	2820,34
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря	106,34	2386,44
Малотоксичні пальники + подача третинного повітря	116,00	2603,39
Малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів	135,34	3037,29
Ступенева подача повітря + подача третинного повітря	106,34	2386,44
Ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	116,00	2603,39
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	96,67	2169,49
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + подача третинного повітря	77,34	1735,59

Детальний аналіз отриманих результатів дозволяє оцінити фізичну сутність кожного методу. За результатами моделювання, без втручання в алгоритм горіння, питомий показник емісії з урахуванням наявного недовантаження котла становить  $k(NO_x) = 193,34$  г/ГДж. Відповідний валовий викид сягає критичного значення ( $E(NO_x) = 4338,99$  т) за звітний період. Таке екологічне навантаження вимагає впровадження оптимізаційних рішень.

Застосування малотоксичних пальників (МП). Спеціальні малотоксичні (екологічні) пальникові пристрої конструюються таким чином, щоб штучно затягнути процес змішування вугільного пилу з повітрям. Складна внутрішня аеродинаміка пальника створює збагачену паливом центральну зону факела, де кисню відверто недостатньо для повноцінного окиснення азоту палива, і бідну периферійну зону. В результаті ядро факела розтягується у просторі, а його

пікова температура знижується. Застосування лише цього відокремленого заходу зменшує показник емісії до 154,67 г/ГДж, а валовий викид падає до 3471,2 т.

Ступенева подача повітря (СПП) та подача третинного повітря (ПТП). Сутність обох методів полягає у цілеспрямованому перерозподілі загального об'єму дуттьового повітря по висоті топкової камери. В основні пальники подається об'єм повітря, що є меншим за стехіометрично необхідний для повного згоряння (коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha < 1$ ). У нижній частині топки утворюється об'ємна відновлювальна зона з жорстким дефіцитом кисню. Організація СПП дозволяє знизити викиди одразу на 30 % ( $E(\text{NO}_x) = 3037,3$  т).

Рециркуляція димових газів (РДГ) передбачає відбір частини вже відпрацьованих і частково охолоджених димових газів з хвостового тракту котла і підмішування їх до свіжого гарячого дуттьового повітря.

Як чітко свідчать результати розрахунків та графічні залежності, відокремлені заходи здатні скоротити емісію в межах 10-30 %. Однак для досягнення сучасних жорстких екологічних нормативів цього недостатньо. Об'єднання різних технологій дає потужний синергетичний ефект, оскільки вони паралельно діють на різні механізми утворення  $\text{NO}_x$  (одночасно створюють і дефіцит кисню, і зону знижених температур).

Комбінування малотоксичних пальників зі ступеневою подачею повітря забезпечує падіння емісії майже вдвічі – показник становить 106,34 г/ГДж, а валовий викид скорочується до 2386,4 т.

Найвищу технологічну ефективність серед усіх розглянутих варіантів демонструє глибока комплексна модернізація топкового процесу: впровадження малотоксичних пальників спільно зі ступеневою подачею повітря та організацією додаткової подачі третинного повітря (МП + СПП + ПТП). Сумарна ефективність такої системи 60 %. При такій конфігурації у топці створюється складна багатозонна аеродинаміка з жорстко контрольованою стехіометрією на кожному висотному ярусі. Показник емісії при цьому зменшується до рекордно низьких для даного котла 77,34 г/ГДж.

**Висновки.** Проведений техніко-екологічний аналіз та математичне моделювання режимів роботи котлоагрегата дозволяють зробити обґрунтовані висновки щодо шляхів оптимізації роботи енергоблоку.

Експлуатація потужного парового котла з рідким шлаковидаленням на високолетучому вугіллі без втручання в топковий процес супроводжується критично високим рівнем генерації оксидів азоту (понад 4,33 тис.т за звітний період), що зумовлено інтенсивним перебігом як термічних, так і паливних реакцій окиснення азоту в ядрі факела.

Впровадження одиничних первинних заходів (тільки малотоксичних пальників, тільки рециркуляції димових газів або ступеневого дуття) хоч і потребує відносно невеликих капіталовкладень під час ремонту, проте забезпечує скорочення викидів лише в діапазоні від 10 % до 30 %.

Оптимальним з точки зору екологічної безпеки та економічної доцільності є застосування комплексних просторових рішень. Найбільший позитивний ефект досягається при трикомпонентній комбінації: «малотоксичні пальники +

ступенева подача повітря + подача третинного повітря». Завдяки комплексному придушенню реакцій утворення NO<sub>x</sub> на різних ярусах топки, забезпечується зниження викидів на 60%. Валовий обсяг забруднення скорочується у 2,5 рази (до 1735,6 т), що дозволяє кардинально знизити техногенне навантаження на довкілля без необхідності капітального будівництва дорогих азотоочисних газових установок.

### **Список літератури:**

1. Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання та контролю забруднення). – Офіційний вісник Європейського Союзу, L 334, 17.12.2010. – С. 17-119.

2. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. – Київ : ОЕП "ГРІФРЕ", 2002. – 42 с.

3. Усов І.Л. Підвищення екологічної ефективності теплових електростанцій: аналіз технологій очищення викидів та підходів до модернізації / І.Л. Усов, Т.В. Шелешей // Вчені записки. – 2025. – Т.36(75), №6(1). – С.141-148.

УДК 628.52: 504.06

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКОСТІ ВИКИДІВ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТЕХНОЛОГІЇ СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ

Осадчук Д.Д., к.т.н., доц. Шелешей Т.В.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*  
osadchukdaniil2005@gmail.com

Науковий керівник: PhD, ас. Беднарська І.С.

**Вступ.** Екологічна безпека теплової енергетики є одним із найгостріших питань сьогодення. У даній роботі розглядається дослідження кількості викидів твердих частинок (золи) залежно від технології спалювання вугілля на теплових електростанціях (ТЕС) [1]. Основна увага приділяється аналізу впливу різних типів котлів та способів спалювання палива на обсяг утворення твердих викидів у димових газах.

**Вихідні дані та об'єкт дослідження.** Як базовий об'єкт розглядається енергоблок з котлом, призначеним для факельного спалювання вугілля з високим вмістом летких (типу газового або довгоплам'яного) з рідким шлаковидаленням. Для уловлювання твердих частинок використовується електростатичний фільтр типу ЕГА з ефективністю золовловлення 98,5 % ( $\eta_{zy} = 0,985$ ). Установки для очищення димових газів від оксидів азоту та сірки відсутні. За звітний період використовувалося донецьке газове вугілля марки ГР (обсяг 1096363 т). Склад робочої маси вугілля (%): вуглець ( $C^r$ ) - 52,49; водень ( $H^r$ ) - 3,50; кисень ( $O^r$ ) - 4,99; азот ( $N^r$ ) - 0,97; сірка ( $S^r$ ) - 2,85; зола ( $A^r$ ) - 25,20; волога ( $W^r$ ) - 10,00; леткі речовини ( $V^r$ ) - 25,92. Нижча теплота згоряння робочої маси становить 20,47 МДж/кг. Масовий вміст горючих речовин у леткій золі дорівнює 1,5 %.

**Методика та результати.** У ході дослідження було здійснено розрахунок специфічного показника емісії твердих частинок та валових викидів для заданого енергоблоку [2]. Оскільки сіркоочисна установка відсутня, викиди твердих частинок сорбенту та продуктів взаємодії не враховувалися. Для порівняння ефективності було проаналізовано частку винесення леткої золи при різних технологіях спалювання палива, серед яких: котли з твердим (сухим) шлаковидаленням; котли з відкритою та напіввідкритою топкою (з рідким шлаковидаленням); котли з двокамерною топкою (в т.ч. з вертикальною передтопкою та горизонтальною циклонною топкою); технології киплячого шару (циркулюючий та бульбашковий); котли з нерухомим шаром [3].

**Висновки.** Порівняльний аналіз розрахункових даних засвідчив, що кількість викидів твердих частинок суттєво залежить від технології спалювання вугілля. Найбільші викиди спостерігаються у котлах із традиційним твердим шлаковидаленням. Натомість впровадження сучасних технологій, зокрема котлів із киплячим шаром та циклонними топками, забезпечує значно менші показники емісії завдяки зниженню частки винесення золи. Це свідчить про

вищу екологічну ефективність інноваційних способів спалювання палива та їхню безперечну перевагу для мінімізації негативного впливу ТЕС на навколишнє середовище.

**Список літератури:**

1. Mojica-Cabeza C.D. A review of the different boiler efficiency calculation and modeling methodologies / C.D.Mojica-Cabeza, C.E. García-Sánchez, R. Silva Rodríguez, L. García-Sánchez // *Informador Técnico*. – 2022. – 86(1). – P. 53-77.

2. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. – Київ, 2002. – 120 с.

3. Будя Ю.С. Кількісні показники викидів суспензованих твердих частинок при різних технологіях спалювання / Ю.С. Будя, П.П. Меренгер, І.С. Беднарська, Т.В. Шелешей // *Сучасна техніка та інноваційні технології*. – 2022. – 21-01. – С. 31-36.

**Алфавітний покажчик авторів\***

Egorova O.Yu.	77	Дмитренко Є.В.	150
Kirsanov O.Yu.	74	Дон Н.Л.	106, 117
Koshelnik O.V.	77	Дорошенко В.М.	69(к)
Ohrenchuk O.O.	74	Єлохов Д.В.	87
Olizarenko V.O.	45	Єрохін Д.М.	83
Pugachova T.M.	45, 60	Жуков Р.О.	97
Savoniuk M.V.	60	Загайнова О.А.	129
Агаджанов Г.Х.	36	Засядьвовк Д.О.	147
Андропова О.В.	38, 125	Захарченко А.С.	141(к)
Антонюк Г.М.	205	Золотько О.В.	170(к)
Баженов В.А.	11	Івкіна Є.С.	164
Беднарська І.С.	58, 67(к), 72, 75(к), 78(к), 90, 167, 172(к), 185(к), 191, 196, 201, 205, 209(к)	Івченко В.В.	120
Біліченко К.В.	48	Капустянський А.О.	55
Богдан А.О.	72	Качан В.А.	114
Борець С.О.	52	Кебус С.В.	147, 170
Бошков Л.З.	41(к)	Кирилів Б.В.	175
Бошкова І.Л.	83(к)	Клімов Р.О.	51, 62, 116, 155
Бувалін М.О.	137	Колесник К.А.	26
Василенко В.А.	201	Коломієць Я.О.	110
Войтенко Ю.В.	127(к)	Комендант С.Г.	41
Волгушева Н.В.	52(к)	Копанцев В.П.	185
Волчок В.О.	87	Корнієнко О.О.	106, 117
Воробйов Н.О.	69	Котенко Д.О.	32
Ганькова В.А.	194	Кошелюк О.В.	14
Геймур В.О.	116	Кравченко Є.О.	69
Германчук Д.Д.	129	Кривозуб Д.Т.	127
Гетманова Л.С.	153	Круглякова О.В.	46
Гончаров Я.Р.	63	Крюковська О.А.	155
Гранішевська А.Р.	196	Крятов А.Г.	69
Гречановський А.П.	52	Кузнецов С.І.	164
Грисевич Р.І.	100	Куляпін Д.В.	141
Грінченко В.С.	13	Курак В.В.	36, 100, 114
Губін А.О.	51	Куріленко С.В.	58
Гузенко В.В.	150(к)	Лещенко І.Г.	182
Гунько О.Ю.	194(к), 199(к)	Лещенко О.В.	182
Густяков С.О.	87	Лісков Д.І.	137
Гуцол О.О.	141	Лугвіна В.А.	78
Денисенко Д.О.	26	Майдан П.С.	14, 110
		Матушкін Д.С.	93
		Машовець Н.С.	110
		Мінко О.М.	30
		Назаренко І.А.	97

Нерубацький В.П.	137	Хайнус М.В.	38
Ніколенко С.В.	125	Харченко Є.С.	123
Нікульшин В.Ю.	67	Царенко В.В.	199
Новосельцев О.В.	133(к)	Цветков А.О.	50
Овчаренко І.О.	167	Чумак С.С.	159
Онiпченко Р.С.	18	Чуприна Л.О.	103
Оробей В.В.	145	Шабров М.Ю.	22
Орфанова М.М.	175(к), 203(к)	Шапаренко Є.А.	191
Осадчук Д.Д.	209	Шаповал А.О.	117
Панфілов А.І.	120	Шелешей Т.В.	58(к), 67, 172, 72(к), 75, 78, 90(к), 167(к), 179(к), 185, 191(к), 196(к), 201(к), 205(к), 209
Пасечний Д.І.	156	Якунін А.В.	145(к), 153(к)
Петрик О.А.	97	Янковська О.М.	11
Пивовар Б.Д.	203	Яценко С.С.	75
Плотніков О.О.	125		
Погребняк І.Ф.	123		
Попенко К.П.	129		
Правосеров А.О.	55		
Радченко А.Ю.	90		
Рашевський А.М.	46		
Розен В.П.	133		
Розен П.В.	133		
Романова К.О.	55, 188		
Русакова Т.І.	147, 159, 182		
Сапон В.О.	196		
Семенюк О.П.	194		
Селіверстова С.Р.	156		
Сікорський А.А.	199		
Скрипка О.О.	150		
Соколан Ю.С.	14		
Соколовська І.Є.	48, 63, 80		
Степанчиков Д.М.	18, 26, 32		
Суворов В.О.	22(к)		
Сухорука В.О.	106		
Тарасенко О.М.	103		
Тельпук Є.В.	159		
Тищенко В.Я.	13		
Тортіка Д.М.	52		
Трубник А.О.	62		
У Цзунянь	188		
Улаш Т.К.	172		
Усов І.Л.	179		
Фатєєва К.О.	41		
Федоряка І.М.	155		

\* (к) – тільки керівник роботи

*Наукове електронне видання*

МАТЕРІАЛИ

Десятої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених

**АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

20 травня 2026 р.

м. Хмельницький, Херсонський національний технічний університет  
[http://kntu.net.ua/Conference\\_ARME](http://kntu.net.ua/Conference_ARME)

**ISBN 978-617-8187-81-1 (електронне видання)**



*Матеріали публікуються в авторській редакції. Відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, імен та інших відомостей, а також за наявність даних, які не підлягають відкритій публікації, несуть автори та наукові керівники опублікованих матеріалів.*

Відповідальний за випуск: Курак В.В.

Підписано до видання 18.05.2026 р. Формат 60×84/8.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 24,45. Обл.-вид. арк. 26,29.  
Замовлення № 3267.

Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру суб'єктів видавничої справи:  
серія ХС №48 від 14.04.2005 р., видано Управлінням у справах преси та інформації  
73000, Україна, м.Херсон, вул. Соборна, 2,  
тел. +38050-133-10-13, e-mail: printvvs@gmail.com