

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

МАТЕРІАЛИ
Дев'ятої Всеукраїнської науково-практичної
інтернет-конференції студентів, аспірантів і
молодих вчених
АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ
СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ



22 травня 2025 р.
м. Хмельницький, Херсонський національний технічний університет
http://kntu.net.ua/Conference_APME

УДК 620.9
А 43

А 43 **Актуальні проблеми сучасної енергетики:** матеріали ІХ Всеукраїнської наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (22 травня 2025 р., м. Хмельницький) / за наук. ред. В.В. Курака, О.В. Андроновой. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2025. – 214 с.

ISBN 978-617-8187-48-4 (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;

Секретар оргкомітету:

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

Члени оргкомітету:

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

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

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

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 01.05.2025 № 107.

Адреса організаційного комітету:

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

УДК 620.9

ISBN 978-617-8187-48-4 (електронне видання)

© Колектив авторів, 2025
© Кафедра енергетики, електротехніки і фізики ХНТУ, 2025
© Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2025

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. Електроенергетика	9
Баженов В.А., Янковська О.М. Питання використання математичних методів для оптимізації режимів сучасних енергосистем	10
Боднар Р.О., Фурса М.В., Степанчиков Д.М. Дослідження роботи різних типів регуляторів в системі керування електроприводу постійного струму	14
Дон Н.Л., Любезний А.В., Плотніков О.О. Моделювання пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Matlab/ Simulink	18
Хоменко В.І., Курманенко А.Р., Бондар І.В. Удосконалення системи збудження автономної генеруючої установки	22
Курак В.В., Вареник К.С. Дослідження впливу індуктивності на параметри однофазного однопівперіодного випрямляча	25
Коваленко О.Ю., Коваль В.В., Степанчиков Д.М. Моделювання напівкрокового режиму керування трифазного крокового двигуна у Matlab	28
Курак В.В., Гайко О.М., Смешко А.А. Система зовнішнього освітлення з подвійним джерелом живлення, побудована на електромагнітних реле	32
В'юнник С.Є. Цілі комплексні числа в задачах кіберзахисту електроенергетичних систем	34
Чайка Д.А. Сучасна класифікація та тенденції розвитку сонячних панелей: технічний аналіз і ринкові перспективи	38
СЕКЦІЯ 2. Теплоенергетика	42
Соколовська І.Є., Лазур В.І., Лазур О.В. Моделювання газодинамічних процесів теплоносія та руху часток матеріалу у вихровому апараті	43
Смирнов А.С., Клімов Р.О. Моделювання роботи комбінованих систем тепlopостачання	46

Кошельник О.В., Жуков О.В., Башлаєв М.А. Особливості моделювання робочих процесів в регенеративних теплообмінниках доменних печей при використанні насадки з фазовим переходом	47
Каракуца В.П., Долгополов І.С. Використання ексергономічного підходу для оцінки енергоефективності послуг ЖКГ України	49
Соляник М.Ю., Яровий О.С., Комар В.П. Дослідження енергоефективності системи теплопостачання житлової будівлі	53
Усов І.Л., Шелешей Т.В. Шляхи підвищення екологічної ефективності теплоенергетичного обладнання шляхом удосконалення топкових процесів і систем теплообміну	55
Коровін О.О., Клімов Р.О., Крюковська О.А. Вплив розвинених поверхонь на геометричні розміри підігрівачів	58
Беднарська І.С., Оліферук Т.С. Оптимізація теплообміну в пароперегрівниках котлоагрегатів шляхом використання чисельного моделювання	59
Трубник А.О., Клімов Р.О. Вплив оребрення трубчастої системи на конструктивне виконання теплообмінника	61
Величко Д.А., Величко О.А. Ультразвуковий захист від накипу теплообмінних апаратів	62
Пугачова Т.М., Савонюк М.В. Вимоги до маневрованих характеристик роботи енергоблока	64
Волчок В.О., Булгару І.М., Густяков С.О. Дослідження системи охолодження РЕА з використанням речовин, що плавляться	66
Тарасенко М.О., Тарасенко О.М., Чупріна Л.О., Солодовник Ю.Ю. Дослідження застосування твердих побутових відходів в системах теплопостачання	70
Пугачова Т.М., Олізаренко В.О. Графіки електричного навантаження та методи їх покриття	73

Беднарська І.С., Яценко С.С. впровадження газотурбінних установок як інструмент модернізації енергетичної системи України	75
СЕКЦІЯ 3. Нетрадиційна та відновлювана енергетика	77
Горський В.В., Дзюбан Ю.І. Підвищення енергоефективності технологічного теплозабезпечення тваринницьких комплексів із використанням високотемпературних теплових насосів, що працюють на фреоні R290	78
Клішня С.С., Колесник К.А., Степанчиков Д.М. Моделювання та дослідження роботи вітропарку у програмному середовищі System Advisor Model	81
Лещенко П.М. Огляд стандартів іее для систем енергетичного менеджменту мікромереж	85
Дон Н.Л., Богомол В.В., Денисенко Д.О. Розробка системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для газорозподільної станції	89
Воїнов О.П., Зініч І.О., Коренкова М.О., Качула І.В. Про літаючі електростанції	93
Курак В.В., Лісова В.В., Тендітний Д.О. Порівняння вироблення енергії фасадними та даховими фотоелектричними системами	96
Кострубов Д.В., Коновалов Р.А. Підвищення енергетичної незалежності та екологічної безпеки підприємств та транспорту	99
Яценко Ф.О., Онїпченко Р.С., Степанчиков Д.М. Моделювання фотовольтаїчної станції з концентруванням сонячного випромінювання	101
Петрик О.А., Назаренко І.А., Жуков Р.О. Розробка уніфікованої методики визначення енергетичного потенціалу використання побічної продукції в якості палива	105
Курак В.В., Комаров С.Ю., Грисевич Р.І. Вдосконалена теплова схема блоку Solar Cell	109

Пікалов Д.Д., Сотник Є.А., Соколовська І.Є. Біогаз як складова енергетичної безпеки України: сучасний стан і перспективи	112
Дон Н.Л., Глушко А.В., Васильєв М.І. Розробка системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для «Пункту незламності» в м. Луцьк	114
Кривенчук А.В., Цветков А.О., Соколовська І.Є. Біомаса в контексті енергетичної безпеки України	118
Смешко А.А., Іванов О.С., Андропова О.В. Оптимізація розміщення фотоелектричних модулів на фасаді багатоквартирного будинку	121
Нерубацький В.П., Фалєєв Ф.Р., Огурцов С.С. Інноваційні технології в галузі вітроенергетики	125
Турчин В.Ю., Андропова О.В. Моделювання систем сонячного нагріву води в System Advisor Model	128
Venedyktova D.V. Distributed generation as an answer to current energy problems	131
Андропова О.В., Данилюк В.В. Оптимізація систем генерації на основі відновлюваних джерел енергії	135
Верташ Д.С., Войтенко Ю.В. Новітні матеріали та елементи для сонячних батарей нового покоління	138
Зайцев О.О., Андропова О.В. Порівняння продуктивності PVT колекторів	142
Смоковський М.В., Чорна Н.А. Використання водневих технологій для автономних енергоустановок	145
Гавриленко Я.В. Гібридні енергетичні структури на основі сонячних електростанцій	148
Нерубацький В.П., Шаповалова Д.С. Інтеграція громадського електротранспорту до енергосистеми на базі відновлюваних джерел енергії з використанням технології Vehicle-to-Grid	152
Chepurko A.O., Feshchenko D.O., Beshynskyi M.I. Implementation of floating solar power plants on water bodies	155

Апостол Я.А., Олименко І.О., Беднарська І.С. Системи опалення та вентиляції з використанням малої гідроелектростанції	157
СЕКЦІЯ 4. Енергозбереження та автоматизація енергетичних процесів	160
Розен П.В., Розен В.П. Математична модель визначення меж обсягу робіт з енергетичного аудиту	161
Нерубацький В.П., Фалєєв Ф.Р., Огурцов С.С. Засоби енергозбереження при експлуатації високошвидкісного залізничного транспорту	165
Коренкова М.О., Коренков О.О., Телегін О.В. Енергозбереження за рахунок організаційних заходів	168
Філічкін Д.К., Клімов Р.О. Моделювання роботи систем підлогового опалення	171
Шевченко Г.О., Самохвалова А.О., Халдобін П.В. Енергозбереження за рахунок вдосконалення суднових рушіїв	172
СЕКЦІЯ 5. Економічні та екологічні аспекти енергозбереження	175
Кузнєцов С.І., Венгер О.О., Івкіна Е.С. Очищення газових викидів теплоелектростанцій від оксидів азоту	176
Тесленко М.О., Островський А.В., Беднарська І.С. Викиди забруднюючих речовин від газотурбінних та газопоршневих установок при спалюванні природного газу	179
Матусевич Х.Б., Беднарська І.С. Оцінка ефективності азотоочисних установок	183
Лі-фан-се Б.В., Леденьов М.І., Беднарська І.С. Інноваційні підходи до видалення діоксиду сірки з димових газів: сучасний стан та перспективи розвитку	186
Ібрагім А.М., Клевцов К.М. Пошук заходів підвищення енергозбереження морського транспорту в мультимодальних перевезеннях. Виявлення ризиків, пов'язаних із їхнім впровадженням	188

Жук Д.В., Погребняк І.Ф. Доцільність використання комбінованої системи ФЕС й теплового насосу для хостелу	191
Бабич А.І., Прищепа Е.П., Беднарська І.С. Методи напівсухого та сухого очищення димових газів: шлях до екологічної стійкості	193
Пейкрішвілі М.Ш., Погребняк І.Ф. Техніко-економічне обґрунтування мережевої сонячної електростанції дахового типу в м. Херсон	195
Климюк А.С., Куляпін Д.В., Онищук М.В. Сучасні технології зниження викидів оксидів азоту в енергетичному секторі	198
Булах І.І., Короташ А.І. Енергоефективність в умовах військового стану: життєва необхідність та стратегія розвитку	201
Гуцол О.О., Олійник Д.А. Аналіз технологій скорочення NO_x у процесах спалювання палива	205
Чмихало Б.О., Галіченко Д.В., Беднарська І.С. Технічні рішення для зменшення зольних викидів в енергетиці: класифікація та аналіз золоочисних систем	208
Алфавітний показчик авторів	212

Секція 1

Електроенергетика

УДК 621.311.1

ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ СУЧАСНИХ 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.

Метою роботи є розробка методів та алгоритмів оптимізації режимів електричної мережі за реактивною потужністю та напругою, що забезпечують ефективне вирішення поставленої задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень.

Загальна задача оптимізації режимів електричної мережі програмування зводиться до мінімізації

$$f(X), X \in E^n \quad (1)$$

при наявності обмежень у вигляді рівностей

$$f_i(X) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

і обмежень у вигляді нерівностей

$$g_i(X) \geq 0, \quad i = m + 1, m + 2, \dots, P. \quad (3)$$

Обмеження (2) будемо враховувати при розрахунку усталеного режиму на кожному кроці оптимізації для фіксованих значень вектору незалежних змінних оптимізації X^k .

Якщо функція $f(X)$ неперервна та диференційована, то напрямком її максимального збільшення при русі з точки багатомірного простору $X^{(k)}$ співпадає з напрямком вектору градієнта $\nabla f(X^{(k)})$. Перехід із точки простору $X^{(k)}$ в точку $X^{(k+1)}$ в алгоритмі швидкого спуску описується співвідношенням

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \lambda^{(k)} \nabla f(X^{(k)}), \quad (4)$$

де $\lambda^{(k)}$ – коефіцієнт довжини k -го кроку процесу оптимізації. Оскільки мінімум цільової функції $f(X)$ не досягається за один крок спуску, перехід (4) повинен повторюватись необхідну кількість разів. Оптимальний коефіцієнт довжини кроку $\lambda^{(k)}$ може визначатися в кожній із точок траєкторії руху чисельними або аналітичним рішенням управління

$$\frac{\partial f(X^{(k)} - \lambda^{(k)} \nabla f(X^{(k)}))}{\partial \lambda} = 0. \quad (5)$$

Використання методу швидкого спуску ускладнене у випадку витягнутого простору, коли лінії рівнів цільової функції утворюють витягнутий «яр». В цьому випадку напрямком антиградієнта майже ортогональний напрямку досягнення мінімуму $f(X)$ і розв’язок задачі або потребує значних витрат часу розрахунку, або взагалі не може бути отриманий. В цьому випадку процедура

швидшого спуску покращується масштабуванням складових градієнта. При цьому перехід від точки $X^{(k)}$ до точки $X^{(k+1)}$ описується виразом:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \xi^{(k)} a_{j\partial} \nabla f(X^{(k)}), \quad (6)$$

де $\xi^{(k)}$ – коефіцієнт довжини кроку; $a_{j\partial}$ – діагональна матриця масштабуючих множників.

При використанні для оптимізації встановлених режимів електричних мереж найбільш перспективних градієнтних методів основна складність полягає у визначенні компонент вектору градієнта $\frac{\partial \Phi(X)}{\partial X}$, де X – вектор регульованих параметрів режиму, у склад якого входять активні та реактивні потужності пунктів.

Часткові похідні можна розраховувати за допомогою методу чисельного диференціювання. В цьому випадку необхідно визначити приріст цільової функції $\Delta \Phi$, який відповідає зміні регульованого параметру Δx_j . Шукана часткова похідна $\frac{\partial \Phi}{\partial x_j}$ приймається рівною відношенню $\frac{\Delta \Phi}{\Delta x_j}$.

Даний метод потребує витрат машинного часу, так як необхідно розраховувати встановлений режим електричної системи при визначенні кожної складової градієнту. Окрім того, при знаходженні часткових похідних повинна забезпечуватися висока точність розрахунку режиму – небаланси потужності у вузлах повинні бути значно менше отриманого приросту втрат. Тому на сьогоднішній день для розрахунку складових градієнту метод чисельного диференціювання практично не використовується.

Зважаючи на складність точного визначення часткових похідних на перших етапах використання комп'ютерів широке розповсюдження отримали різні наближені методи, в яких використовуються спрощенні формули, матрицю з-опорів, матриці чуттєвості та ін.

Точні алгоритми розрахунку часткових похідних, які потрібні для отримання точних результатів оптимізації та оцінки справедливості допущень, що приймаються в наближених методах, засновані на правилах диференціювання складних та неявних функцій. Розглянемо два види розрахункових виразів для визначення похідних цільової функції по вектору регульованих параметрів.

Для розрахунку градієнта цільової функції Φ по вектору потужностей пунктів X використовується вираз

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} = \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial X}, \quad (7)$$

де вектор $\frac{\partial \Phi}{\partial Y}$ визначається диференціюванням функції Φ з явної залежності $\Phi(Y)$; Y – вектор залежних параметрів режиму, в склад якого входять модулі та кути напруги пунктів мережі; $\frac{\partial Y}{\partial X}$ – матриця часткових похідних від залежних параметрів режиму по незалежним.

Нехай нелінійні рівняння встановленого режиму записані у вигляді

$$\varepsilon X = X(Y) - X = 0, \quad (8)$$

де εX – вектор небалансів потужності у вузлах мережі; $X(Y)$ – явні функції незалежних параметрів режиму від складових вектору Y .

Шукана матриця $\frac{\partial Y}{\partial X}$ визначається з рівняння

$$\frac{\partial \varepsilon X}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial X} = - \frac{\partial \varepsilon X}{\partial X} = \frac{\partial X}{\partial X},$$

де $\frac{\partial X}{\partial X}$ – одинична матриця, так як її коефіцієнти представляють собою часткові похідні вигляду $\frac{\partial x_s}{\partial x_j}$, які при $s=j$ рівні 1, а при $s \neq j$ – нулю.

Позначивши одиничну матрицю I , отримаємо

$$\frac{\partial X(Y)}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial X} = I. \quad (9)$$

Перший метод визначення часткових похідних від втрат потужності в мережі базується на використанні рівняння (9) у сукупності з виразом (7).

Розглянемо основні положення другого методу. Визначимо з (9) матрицю похідних від залежних параметрів по незалежним

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = \left(\frac{\partial X(Y)}{\partial Y} \right)^{-1}, \quad (10)$$

де $\left(\frac{\partial X(Y)}{\partial Y} \right)^{-1}$ – обернена матриця. Підставивши (10) у (7), знаходимо

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X} = \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \left(\frac{\partial X(Y)}{\partial Y} \right)^{-1}.$$

Транспонуючи матрицю $(\partial X(Y)^{-1} / \partial Y)$, вектори $\frac{\partial \Phi}{\partial X}$ та $\frac{\partial \Phi}{\partial Y}$, отримаємо

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)^T = \left[\left(\frac{\partial X(Y)}{\partial Y} \right)^{-1} \right]^T \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right)^T.$$

Перетворюючи останній вираз до вигляду

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right)^T = \left[\left[\left(\frac{\partial \Phi(Y)}{\partial Y} \right)^{-1} \right]^T \right]^{-1} \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)^T,$$

знаходимо рівняння для розрахунку шуканих частинних похідних

$$\left(\frac{\partial X(Y)}{\partial Y} \right)^T \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)^T = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right)^T. \quad (11)$$

Другий метод визначення частинних похідних від Φ по потужності пунктів ґрунтується на розв'язку рівняння (11). Застосування перших виразів потребує великої кількості обчислювальних операцій для розрахунку складової градієнта. Крім того, необхідно зберігати в повнозаповнену матрицю частинних похідних від залежних параметрів режиму незалежних $\frac{\partial Y}{\partial X}$. Однак необхідно відмітити, що дана матриця дозволяє прискорити процес оптимізації в цілому.

Для врахування функціональних обмежень при оптимізації режимів електричних систем доцільно використовувати комбінований метод штрафних функцій, який дозволяє призначати як зовнішні штрафи при порушенні обмежень, так і внутрішні при наближенні до границь допустимої області. При

цьому обмеження за незалежними змінними враховуються за допомогою методу утримуючих обмежень. При використанні комбінованого методу штрафних функцій задача оптимізації режиму перетворюється в послідовність задач, кожна із яких не має обмежень. З цією метою множина індексів усіх функціональних обмежень розбивається на дві підмножини. Перша з них включає в себе індекси обмежень, яку були порушені, а друга – індекси обмежень, які виконані в початковій точці пошуку.

Цільова функція, що мінімізується, записується у вигляді

$$\bar{\Phi}(X) = f(X) + \frac{1}{\varepsilon'} P'(X) + \varepsilon'' P''(X), \quad (12)$$

де ε' та ε'' – коефіцієнти штрафу; $P'(X)$ – зовнішні штрафні функції; $P''(X)$ – внутрішні штрафні функції.

Початкові значення коефіцієнтів штрафу ε' та ε'' розраховуються на першому циклі оптимізації як відношення довжин векторів $\nabla f(X)$, $\nabla P'$ та $\nabla P''(X)$.

При визначенні кожної точки відносно мінімуму функції $\bar{\Phi}(X)$ розраховуються нові значення коефіцієнтів. При цьому всі вони повинні бути додатні, значення кожного наступного коефіцієнту має бути менше значення попереднього та межа послідовності коефіцієнтів при прямуванні номеру коефіцієнта до нескінченності має бути рівною нулю.

Методи та алгоритми оптимізації режимів електричної мережі за реактивною потужністю та напругою, що запропоновані в роботі, забезпечують ефективне вирішення задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних функціональних обмежень.

Розрахунки показали, що запропонована методика оптимізації відрізняється швидкою збіжністю, досить стійка до вибору початкових наближень.

Список літератури:

1. Баженов В.А. Моделирование электрической сети при оптимизации развития энергосистем / В.А. Баженов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 5. – К.: 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. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.
3. Баженов В.А. Використання методів лінійного програмування для оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем / Баженов В.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – №2. – С. 93-97.
4. Баженов В.А. Використання методу гілок і границь для оптимізації розвитку електричних мереж сучасних енергосистем / В.А. Баженов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – №6. – С. 64-69.

УДК 621.3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РІЗНИХ ТИПІВ РЕГУЛЯТОРІВ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Боднар Р.О., Фурса М.В., 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.

Сучасне промислове виробництво характеризується використанням високопродуктивних технологічних машин і механізмів, оснащених електричним приводом та системами автоматичного керування. Практично всі транспортні, промислові, медичні та побутові установки, засновані на механічному русі і використовують електричну енергію як енергетичну основу для виконання технологічних операцій та процесів. Досконалість електроприводу машин і агрегатів, ступінь їх автоматизації багато в чому визначають технічний рівень робочих машин в цілому.

У багатьох сучасних приладах у якості приводу використовується електродвигун, швидкість обертання якого повинна бути постійною і не відрізнятися від бажаної більш, ніж на задану величину, обумовлену статичною помилкою. Необхідну якість роботи електродвигуна може забезпечити система керування, яка містить зворотний зв'язок по стану та відповідний регулятор [1,2].

Метою роботи є розробка математичної моделі системи керування швидкістю обертання електричного двигуна постійного струму та її реалізація. в пакеті MatLab/Simulink, дослідження роботи різних типів регуляторів.

Розглянемо систему керування двигуном постійного струму по колу якоря. Під законом регулювання розуміють залежність вихідної величини регулятора U (напруги живлення якірної обмотки) від його вхідної величини $\Delta\omega$ (відхилення швидкості обертання вала від номінального значення) за умови, що інерція самого регулятора не враховується:

$$U = f(\Delta\omega). \quad (1)$$

Залежно від вигляду функції $f(\Delta\omega)$ існують три основні принципові закони та відповідні їм типи регуляторів [3]:

- пропорційний, реалізується за допомогою П-регулятора;
- інтегральний (І-регулятор);
- диференціальний (Д-регулятор).

На практиці здебільшого використовують комбіновані закони регулювання, які об'єднують позитивні властивості вказаних вище принципів керування і відповідних регуляторів. Найбільш загальним типом регуляторів є пропорційно-інтегрально-диференціальний ПІД-регулятор, математичний запис якого має вигляд:

$$U = k_p \Delta \omega + k_d \frac{d\Delta \omega}{dt} + k_i \int_0^t \Delta \omega dt, \quad (2)$$

де k_p , k_d , k_i – коефіцієнти передачі пропорційного, диференціального та інтегрального законів регулювання відповідно.

ПІД-регулятор застосовують у системах керування, коли потрібно поліпшити як вид перехідного процесу, так і точність у режимі, що встановився. Досить часто в конкретній системі керування не потрібно виконання всіх трьох операцій. У цьому випадку може бути використаний один із трьох варіантів регулятора:

- пропорційний (П-Регулятор);
- пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор);
- пропорційно-диференціальний (ПД-Регулятор).

На підставі структурної схеми двигуна постійного струму, який управляється по колу якоря (рис. 1, а) і закону керування (2) розроблена машинна схема моделювання (рис. 1, б), яка реалізована у програмному середовищі MatLab/Simulink [4].

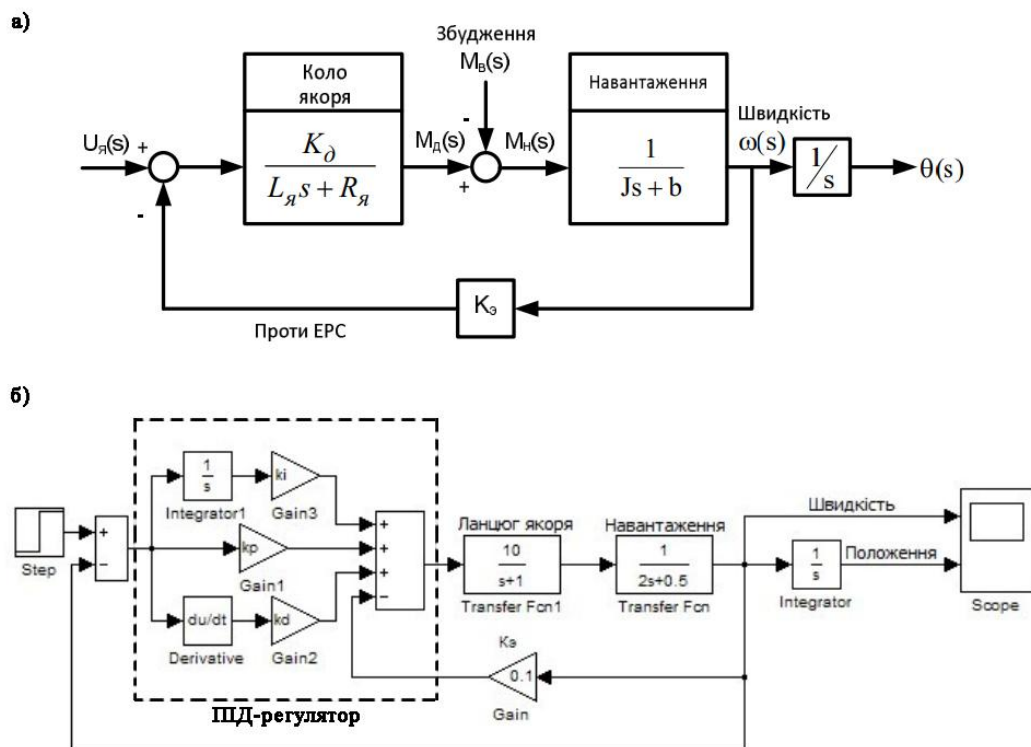


Рисунок 1 – Структурна схема двигуна, який управляється по колу якоря (а) та схема моделювання системи керування електродвигуном по колу якоря, реалізована у MatLab/Simulink (б)

Було досліджено чотири типи регуляторів (П, ПІ, ПД і ПІД). Їх реалізація на схемі (рис.1, б) досягається шляхом комбінації значень коефіцієнтів передачі k_p , k_d , k_i . Для ПІД-регулятора всі значення коефіцієнтів передачі ненульові, для ПД-регулятора $k_i = 0$, для ПІ-регулятора $k_d = 0$, для П-регулятора $k_d = k_i = 0$.

Таким чином, запропонована схема моделювання є універсальною і дозволяє реалізувати всі типи регуляторів.

Результати моделювання перехідних процесів для чотирьох типів регуляторів (П, ПІ, ПД і ПІД) у системі керування електродвигуна по колу якоря наведено на рис. 2 та у табл. 1.

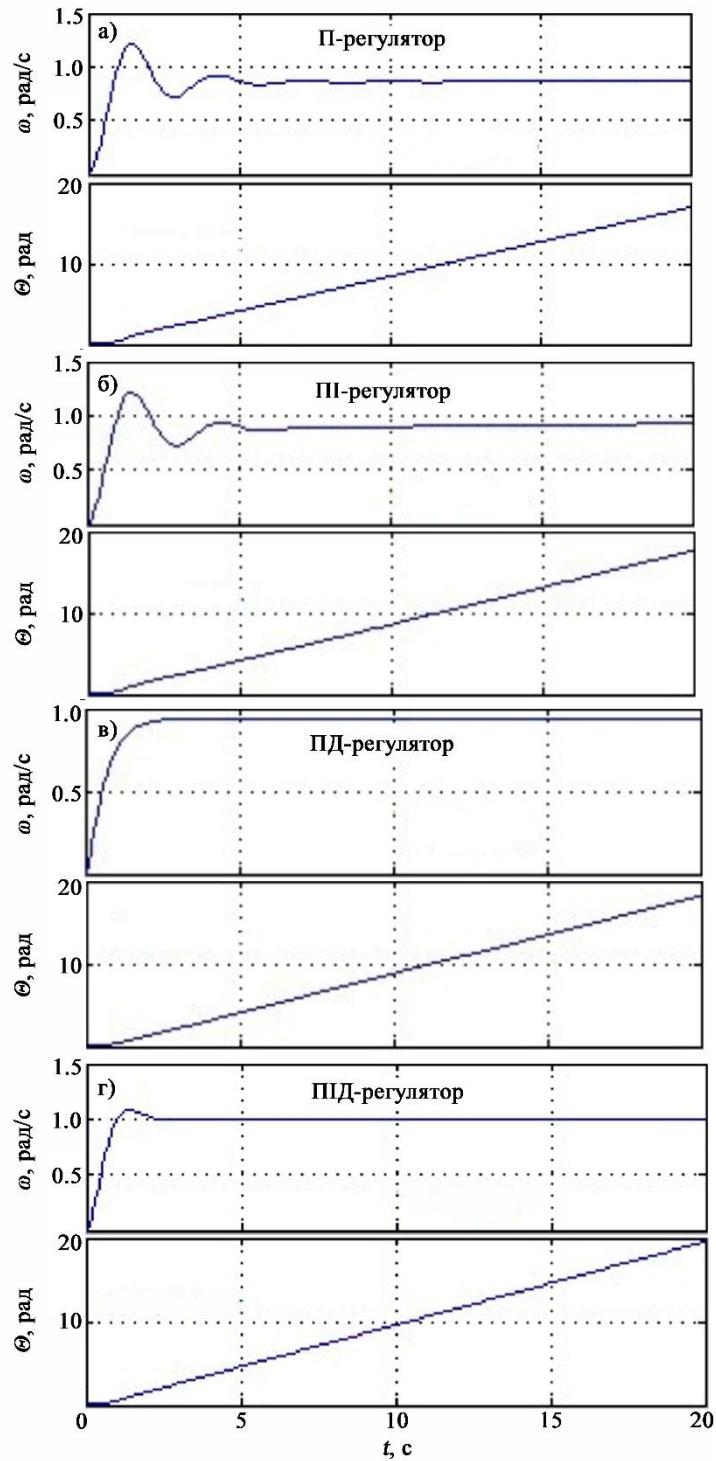


Рисунок 2 – Графіки перехідних процесів при регулюванні швидкості обертання ω і кутового переміщення θ на валу двигуна постійного струму для різних типів регуляторів в колі якоря

Таблиця 1

**Результати роботи різних типів регуляторів в системі керування по колу
якоря двигуна постійного струму**

характеристики	типи регуляторів			
	П	ПІ	ПД	ПІД
коефіцієнти	$k_p = 0.90$ $k_d = 0.00$ $k_i = 0.00$	$k_p = 0.84$ $k_d = 0.00$ $k_i = 0.03$	$k_p = 2.45$ $k_d = 1.47$ $k_i = 0.00$	$k_p = 1.66$ $k_d = 0.49$ $k_i = 0.35$
час перехідного процесу, с	11.75	19.45	2.45	2.15
коливальність, %	21.29	21.94	0.00	9.03
статична похибка, %	14.55	8.10	6.16	1.00
усталена швидкість, рад/с	0.85	0.92	0.94	1.01
переміщення за 20 с, рад	16.95	17.67	18.21	19.57

Аналіз графіків (рис. 2) та результатів, наведених у табл. 1 показує, що найкращі показники якості перехідного процесу, забезпечує ПІД-регулятор, на другому місці ПД-регулятор, на третьому – ПІ-регулятор. Недоліком ПІД-регулятора є наявність коливальності (перерегулювання).

Список літератури:

1. Смирнов К.В. Комп'ютерне дослідження режимів роботи та характеристик двигуна постійного струму / К.В. Смирнов, М.О. Браточенко, Д.М. Степанчиков // “Актуальні проблеми сучасної енергетики”: зб. тез доп. VI всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (м. Херсон, 19-21 травня, 2021р.). – Херсон: ПП "Резнік", 2021. – С. 115-118.

2. Степанчиков Д.М. Моделювання системи керування режимами роботи асинхронного двигуна як складова частина віртуального лабораторного курсу з електротехнічних дисциплін / Д.М. Степанчиков, Є.О. Васильєв // IX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління (м. Херсон, 12-14 квітня, 2021 р.): Тези доповідей. – Херсон, Видавництво ПП Вишемирський В.С., 2021. – С. 31-32.

3. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко М.Ф., Франат С.С., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

4. Гурко О.Г. Аналіз і синтез систем автоматичного керування в MATLAB: Навчальний посібник / Гурко О.Г., Єрьоменко І.Ф. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 300 с.

УДК 621.31

МОДЕЛЮВАННЯ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ В MATLAB/ SIMULINK

К.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л., Любезний А.В., Плотніков О.О.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
don.natalia@kntu.edu.ua

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

Асинхронні машини є найпоширенішим видом безколекторних електричних машин змінного струму, що застосовуються в сучасних електричних установках. Як і будь-яка електрична машина, асинхронна машина оборотна і може працювати як у генераторному, так і в двигунному режимах. Однак переважне застосування мають саме асинхронні двигуни, що становлять основу сучасного електроприводу [1].

В даній роботі проведено моделювання режимів роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4A160S2Y3. Паспортні дані двигуна наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри асинхронного двигуна 4A160S2Y3 [1]

$P, \text{кВт}$	$U_{1H}, \text{В}$	$n, \text{об/хв}$	$f, \text{Гц}$	$I_{\partial\partial}, \text{кА} \cdot \text{м}^2$	λ_m	$S_H, \%$	$\eta, \%$	$\cos \varphi$
11	220	1500	50	0,023	2,8	2,3	88	0,87

В додатку Simulink пакета MATLAB фірми Mathwork [2] проведено моделювання перехідних процесів в системі регулювання швидкості при векторному керуванні під час пуску двигуна з наступним навантаженням та під час пуску приводу при прямому включенні в мережу згідно методики [3].

Моделювання пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4A160S2Y3 проведено на моделі рис. 1 в Simulink/MATLAB [2]

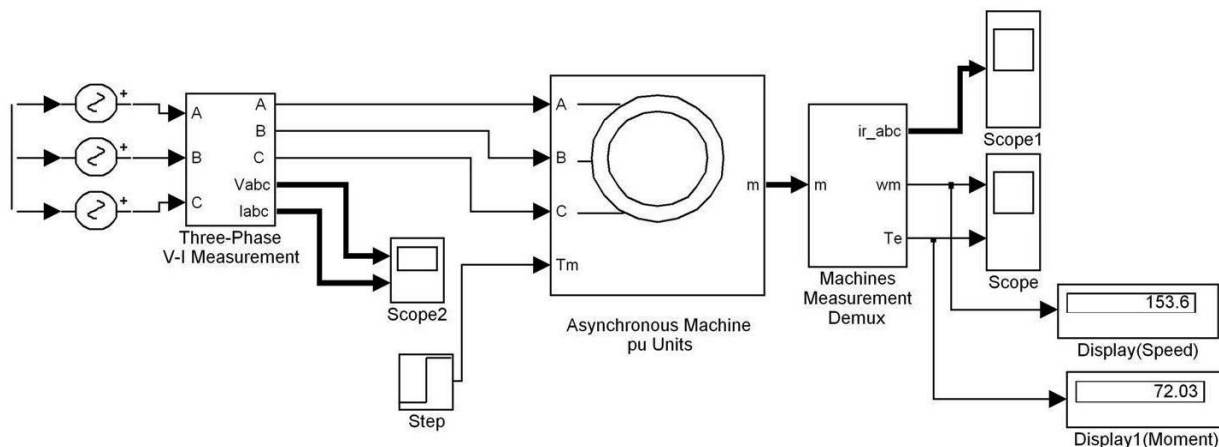


Рисунок 1 – Модель системи з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором, реалізована в Simulink/MATLAB [2]

За основу для розробки досліджуваної моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Simulink [2] взято бібліотеку блоків, з яких складаються структурні схеми систем автоматичного регулювання згідно [3].

Розрахунок перехідних процесів виконано за допомогою відповідних операцій Simulink-меню з використанням функцій MATLAB, зокрема за структурною схемою моделі асинхронного двигуна при довільному повороті обертової системи координат α - β щодо просторових векторів [2,3].

Пуск двигуна з наступним навантаженням моделювався через 3 с при двох різних частотах напруги живлення: 50 Гц і 25 Гц згідно до вимог частотного керування.

При частоті мережі живлення $f = 50 \text{ Гц}$ і лінійній напрузі $U_{1л} = 380 \text{ В}$ моделюванням отримано графіки перехідних процесів $\omega = f(t)$ і $M_n = f(t)$. Результати моделювання наведено на рис. 2.

Після закінчення перехідного процесу визначено параметри усталеного режиму: $\omega = 153,6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $M_n = 72,03 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

При частоті мережі живлення $f = 25 \text{ Гц}$ і лінійній напрузі $U_{1л} = 269 \text{ В}$ моделюванням отримано графіки перехідних процесів $\omega = f(t)$ і $M_n = f(t)$. Результати моделювання наведено на рис. 3.

Після закінчення перехідного процесу визначено параметри усталеного режиму: $\omega = 76,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $M_n = 72,0 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Пуск приводу при прямому включенні асинхронного двигуна в мережу моделювався на ідеальному неробочому ході від нуля до швидкості неробочого ходу при східчастому задаванні частоти згідно методики [3].

На рис. 4 представлено графіки $\omega = f(t)$ і $M_n = f(t)$, що демонструють існування двох перехідних процесів, які мають місце в системі під час пуску приводу при прямому включенні двигуна.

До початку зазначеного процесу всі змінні були рівними нулю, тобто існували нульові початкові умови.

У момент часу $t=1 \text{ с}$ миттєво був прикладений момент навантаження, що призводить до появи другого перехідного процесу. До цього моменту швидкість двигуна, струми і потокозчеплення вже досягли своїх усталених значень, що визначили ненульові початкові умови для другого процесу. У такому випадку їхнє окреме визначення не потрібне, оскільки обидва процеси розраховувалися в рамках однієї задачі та початкові умови для другого процесу були визначені автоматично за допомогою відповідних операцій Simulink-меню з використанням функцій MATLAB [2].

Оскільки в роботі не ставилось завдання використання конкретних елементів системи керування електроприводом, було прийнято такі спрощення: коефіцієнт передачі перетворювача рівний одиниці, так само, як і коефіцієнти зворотних зв'язків. Таке спрощення не впливає на характер перехідних процесів і позначиться тільки на розрахованих значеннях коефіцієнтів регуляторів та сталих значеннях величин, оскільки передавальні функції розімкнутих контурів залишаються при цьому відповідними до стандартних налаштувань згідно [1].

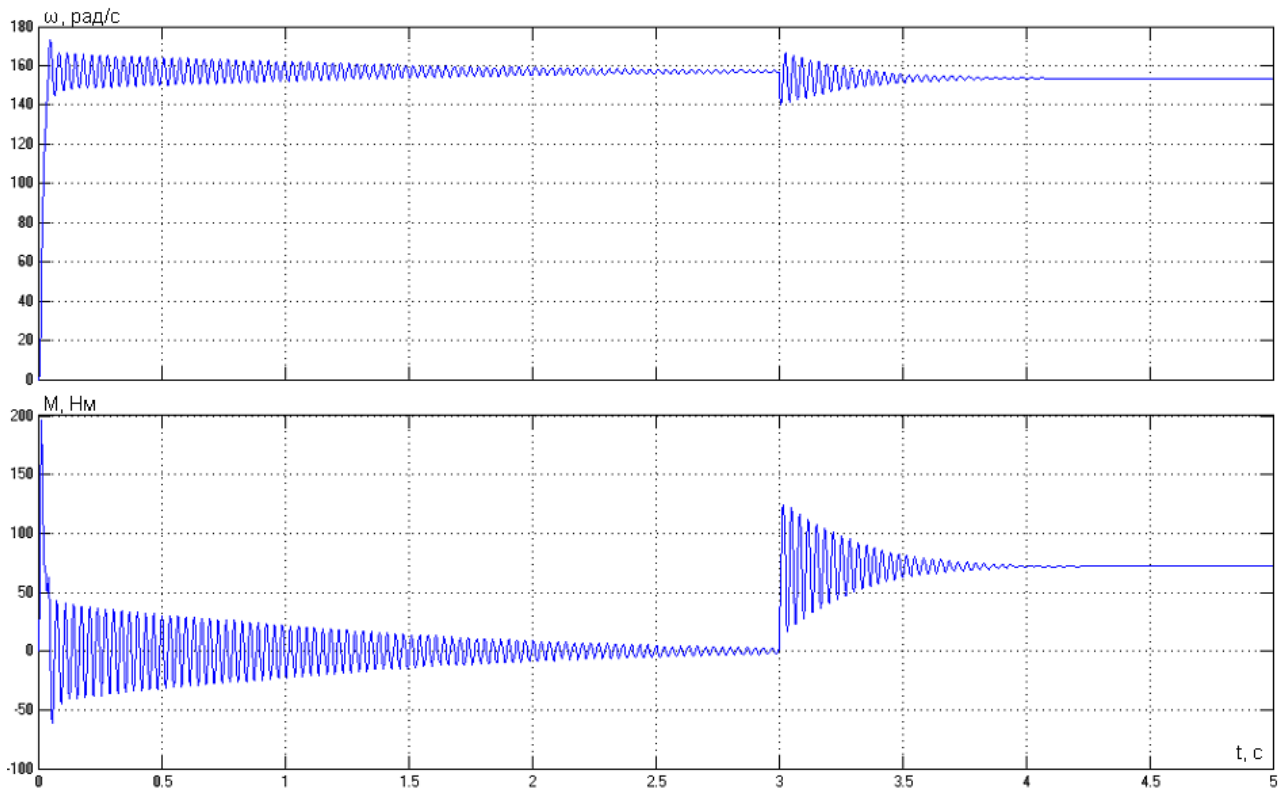


Рисунок 2 – Моделювання перехідних процесів під час пуску двигуна з наступним навантаженням при $f=50$ Гц

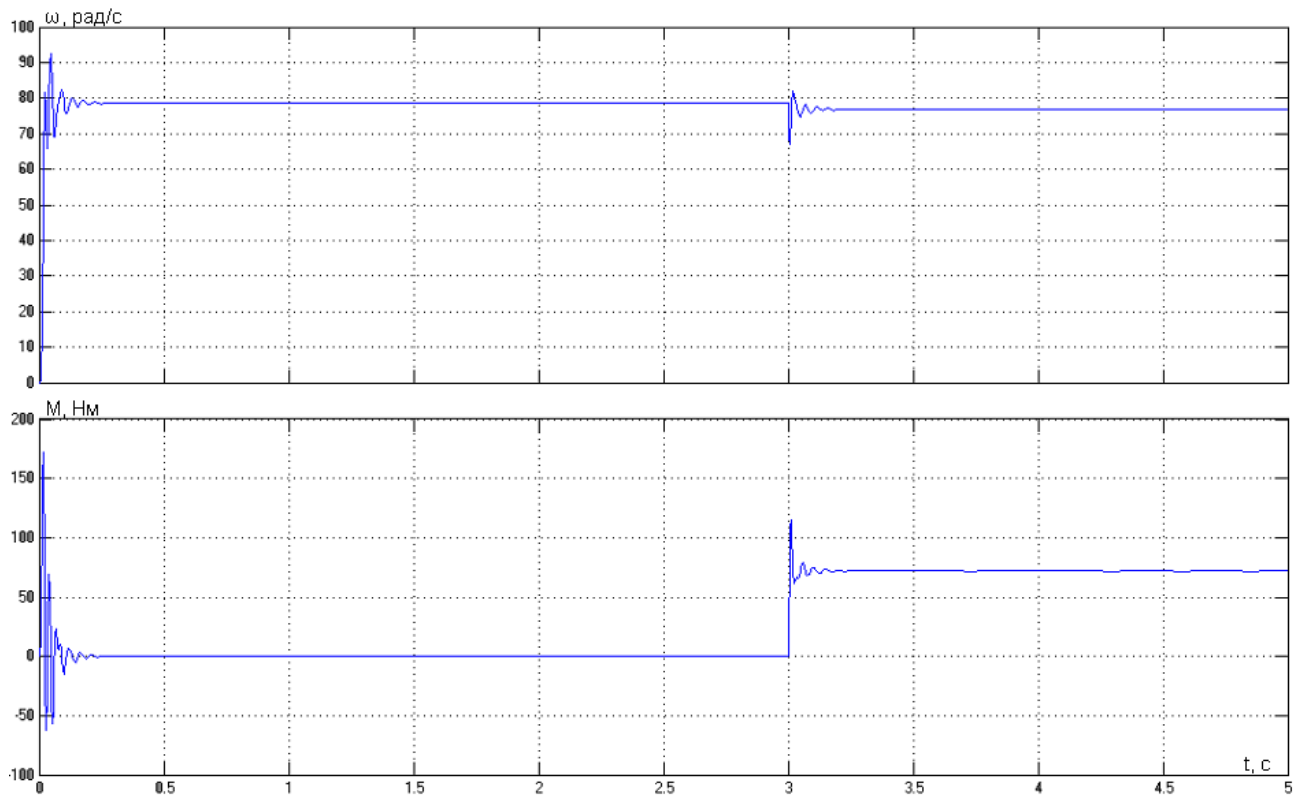


Рисунок 3 – Моделювання перехідних процесів під час пуску двигуна з наступним навантаженням при $f=25$ Гц

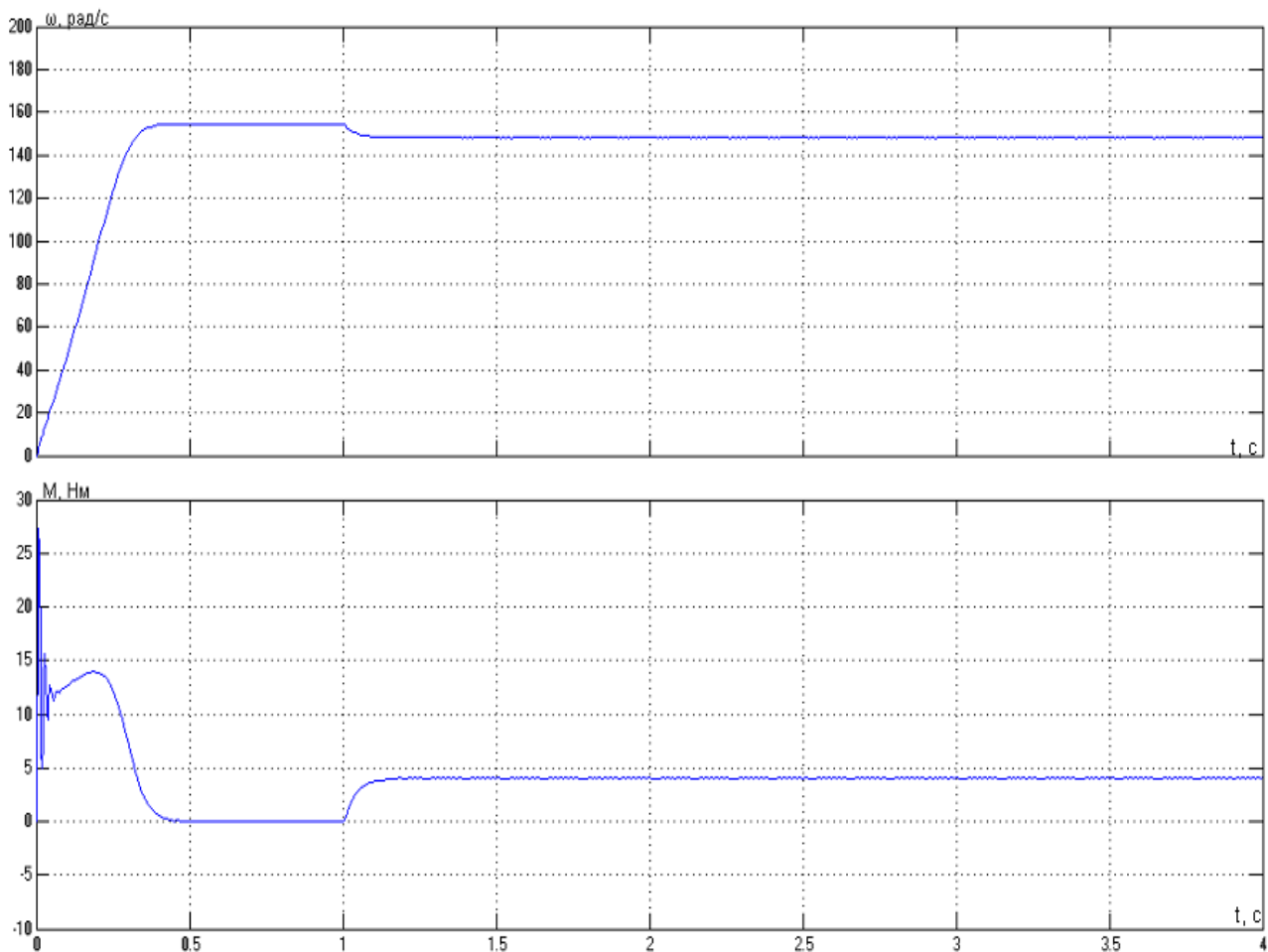


Рисунок 4 – Моделювання перехідних процесів під час пуску приводу при прямому включенні в мережу

З наведених осцилограм видно, що перехідні процеси практично відповідають налаштуванню на механічного обладнання. Для зручності подальшого аналізу на осцилограмах зазначено масштабні коефіцієнти. Значне падіння швидкості при поданні навантаження пояснюється тим, що при налаштуванні застосований пропорційний регулятор швидкості.

Список літератури:

1. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О.І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
2. Simulink Online - MATLAB & Simulink [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://se.mathworks.com/products/simulink-online.html> (дата звернення: 18.04.2025). – Назва з екрана.
3. Лозинський, А. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB: навчальний посібник / А. Лозинський, В. Мороз, Я. Паранчук. – Львів: Видавництво НУ «ЛП», 2000. – 166 с.

УДК 621.313.322

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ АВТОНОМНОЇ ГЕНЕРУЮЧОЇ УСТАНОВКИ

К.т.н., викладач-методист Хоменко В.І.,

Курманенко А.Р., Бондар І.В.

Придніпровський металургійний фаховий коледж, м. Кам'янське

homenkovipatriot@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., викладач-методист Хоменко В.І.

Вступ. На даний час у світовій енергетиці спостерігається зростання автономних генеруючих установок (АГУ), які є незмінним джерелом електричної енергії у малонаселених місцевостях, де прокладання ліній електропостачання є недоцільним, а також у місцевостях, доступ до яких ускладнений (гірські місцевості, острова і т.д.) [1, 2].

Для підвищення стійкості АГУ та стабілізації вихідної напруги застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження та системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ).

Однак, при підключенні споживачів співставної потужності, наприклад, асинхронних двигунів з к.з. ротором АГУ втрачають стійкість із-за інерційності контуру збудження та значного динамічного падіння напруги, що призводить до відключення попередньо підключених споживачів [1].

Мета роботи: експериментальне дослідження системи керування збудженням АГУ для підвищення стійкості та стабілізації вихідної напруги генератора шляхом компенсації інерційності обмотки збудження при значних збуреннях.

Основний зміст. Принципова схема системи збудження СГ АГУ наведена на рис. 1.

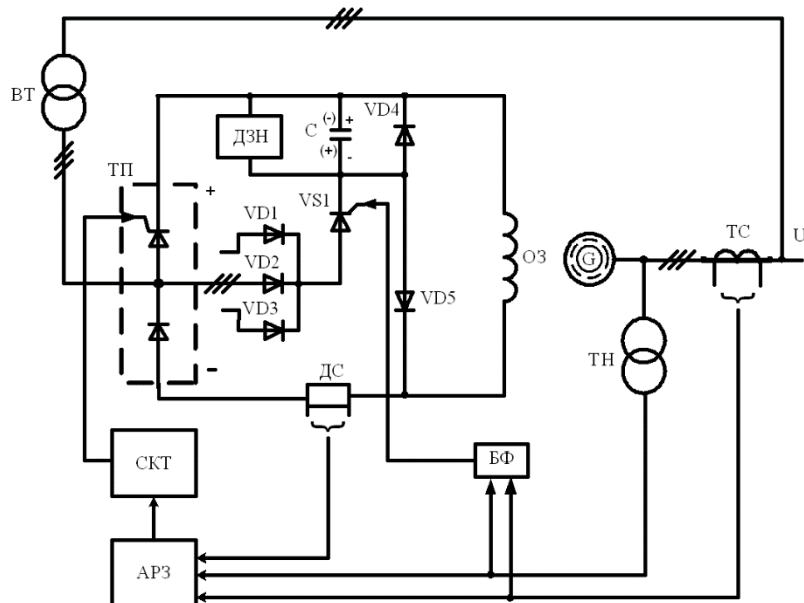
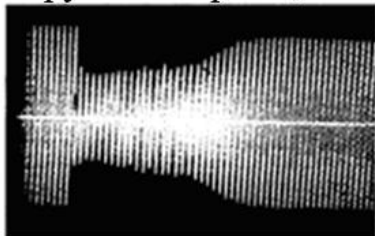


Рисунок 1 – Принципова схема системи збудження СГ АГУ

Стабілізація вихідної напруги СГ при підключенні споживачів забезпечується системою АРЗ. У випадку при зниженні напруги до $0,85U_n$ або зростання струму вище $2I_n$ блок форсування (БФ) вмикає тиристор VS1, що призводить до розряду конденсатора на тиристорний перетворювач (ТП) і обмотку збудження (ОЗ) та компенсації інерційності ОЗ. За час, рівний чверті коливального розряду конденсатора система АРЗ встановлює необхідний рівень напруги збудження, а діод VD4 вмикає конденсатор із контуру збудження. Експериментальні дослідження виконанні на СГ типу МСА 72/4А, потужністю 12 кВт, $U_{1n}=230$ В; $i_{ном}=36,7$ А; струм ротора 23 А при підключенні асинхронного двигуна (АД) потужністю 11 кВт.

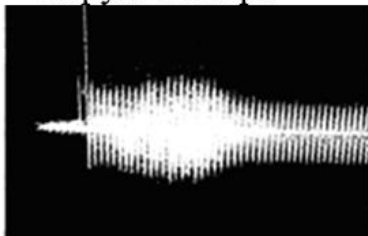
На рис. 2 наведені осцилограми при підключенні АД до АГУ з некомпенсованим контуром збудження, а на рис. 3 – осцилограми з компенсованим контуром збудження.

Напруга статора $U_r = \sqrt{2} \cdot 230$ В



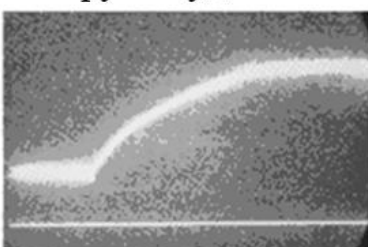
$\Delta U_r \% = 39\%$; $t_{стаб} = 1,2$ с

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36$ А; $I_{max} = \sqrt{2} \cdot 70$ А

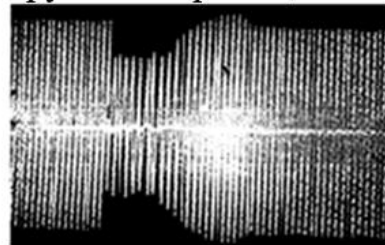
Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13$ А; $I_{f_{фор}} = 117$ А

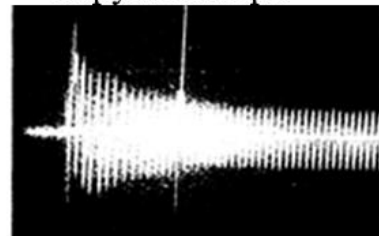
Рисунок 2 – Режим підключення АД з некомпенсованим контуром збудження

Напруга статора $U_r = \sqrt{2} \cdot 230$ В



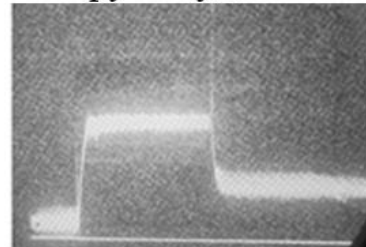
$\Delta U_r \% = 11\%$; $t_{стаб} = 0,36$ с

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36$ А; $I_{max} = \sqrt{2} \cdot 70$ А

Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13$ А; $I_{f_{фор}} = 117$ А

Рисунок 3 – Режим підключення АД з компенсованим контуром збудження

Порівняльний аналіз одержаних виразів показує, що наявність ЄНЕ в контурі збудження сприяє більш інтенсивній зміні струму в даному контурі, оскільки в чисельнику знаходиться форсований член, а знаменник еквівалентний знаменнику коливальної ланки при відповідному виборі величини ємності.

При послідовній компенсації ОЗ величина напруги ЄНЕ може бути меншою напруги збуджувача, так як ЄНЕ виконує роль джерела струму. При паралельній компенсації ОЗ величина напруги ЄНЕ повинна бути більше форсованої напруги збуджувача.

Висновок. Підвищення динамічної стійкості синхронного генератора АГУ при підключенні споживачів співставної потужності може бути забезпечено ємнісною компенсацією інерційності контуру збудження. Розроблена система збудження забезпечує стійкість роботи АГУ та стабілізацію вихідної напруги при підключенні споживачів співставної потужності та нормальне живлення попередньо підключених споживачів.

Список літератури:

1. Хоменко В.І. Техніко-енергетичні показники автономної системи електроживлення на базі синхронного генератора / В.І.Хоменко, В.Б. Нізімов. – Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej "Inżynieria i technologia. – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. – С. 66-70.
2. Сегеда М.С. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: навч. посібник / М.С. Сегеда, М.Й. Олійник, О.Б. Дудурич. – Львів: Видавництво львівської політехніки, 2019. – 204 с.

УДК 621.314.632

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНДУКТИВНОСТІ НА ПАРАМЕТРИ ОДНОФАЗНОГО ОДНОПІВПЕРІОДНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

К.т.н., доц. Курак В.В., Вареник К.С.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
vk_74@ukr.net

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

На даний час пристрої силової електроніки охоплюють широке коло промислових, комунальних, транспортних систем для здійснення високоефективного контролю потужності споживачів електричної енергії. Окрім того, в сучасних електричних мережах силова електроніка незамінна у високовольтних системах постійного струму, статичних тиристорних компенсаторах активної та реактивної потужності, системах безперебійного живлення, генеруючих системах на базі відновлюваних джерел.

У зв'язку з цим, важливим етапом на шляху підготовки кваліфікованих фахівців з електричної інженерії, є формування відповідного рівня знань, умінь і навичок щодо систем силової електроніки, одним з невід'ємних елементів яких є випрямлячі.

В даній роботі запропоновано Simulink-модель однофазного однопівперіодного випрямляча, що працює на активно-індуктивне навантаження, а також представлено результати моделювання впливу індуктивності на параметри випрямляча.

Блочна модель однофазного однопівперіодного випрямляча, побудована в програмному середовищі MATLAB/Simulink [1], представлена на рис. 1.

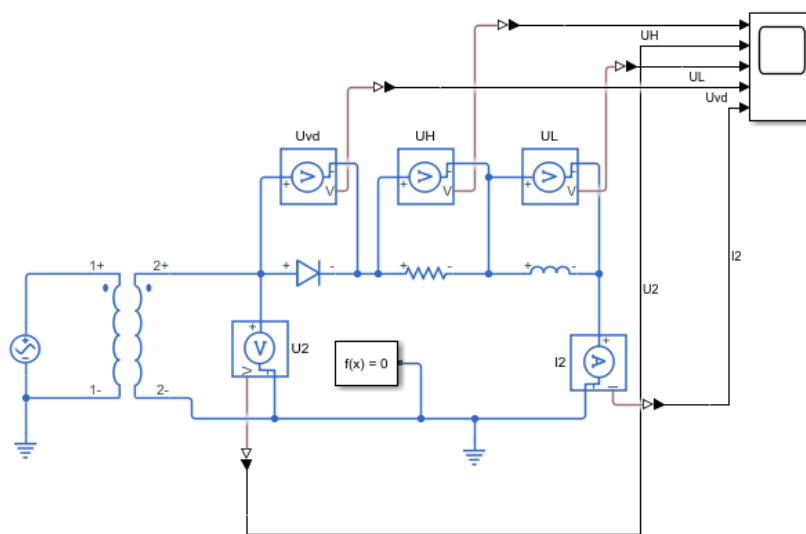


Рисунок 1 – Simulink-модель однофазного однопівперіодного випрямляча

Для побудови моделі використовувались стандартні блоки з бібліотеки

Simulink, такі як: AC Voltage Source, Ideal Transformer, Diode, Resistor та Inductor. Передбачено можливість контролю струму в колі навантаження I_2 , напруги на вторинній обмотці трансформатора U_2 , падінь напруг на діоді U_{VD} , активному опорі U_H та індуктивності навантаження U_L з виведенням осцилограм цих електричних параметрів на осцилограф Scope.

Наявність в навантаженні індуктивності L_H істотно змінює характер електромагнітних процесів в схемі в порівнянні з роботою випрямляча на активне навантаження R_H . Завдяки явищу самоіндукції наростання струму в навантаженні відбуватиметься поступово і тим повільніше, чим більша постійна часу τ_H [2]:

$$\tau_H = \frac{L_H}{R_H}. \quad (1)$$

При значеннях постійної часу τ_H , значно більших за період випрямленої напруги T , тобто, коли $\tau_H \gg T$, струм в навантаженні стає практично згладженим. Отже, за умов значних індуктивностей амплітуда випрямленого струму у колі навантаження менше відрізнятиметься від його середнього значення у порівнянні з чисто активним навантаженням.

Середнє значення випрямленої напруги у випадку однопівперіодного випрямляча з активно-індуктивним навантаженням визначається виразом [3]:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\lambda_{VS}} U_{2m} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{U_{2m}(1 - \cos \lambda_{VS})}{2\pi}, \quad (2)$$

де U_{2m} – амплітудне значення напруги на вторинній обмотці трансформатора; λ_{VS} – фаза, що відповідає тривалості протікання струму через навантаження.

На рис. 2 наведено осцилограми струму і напруг, отримані за результатами моделювання роботи однофазного однопівперіодного випрямляча на активно-індуктивне навантаження.

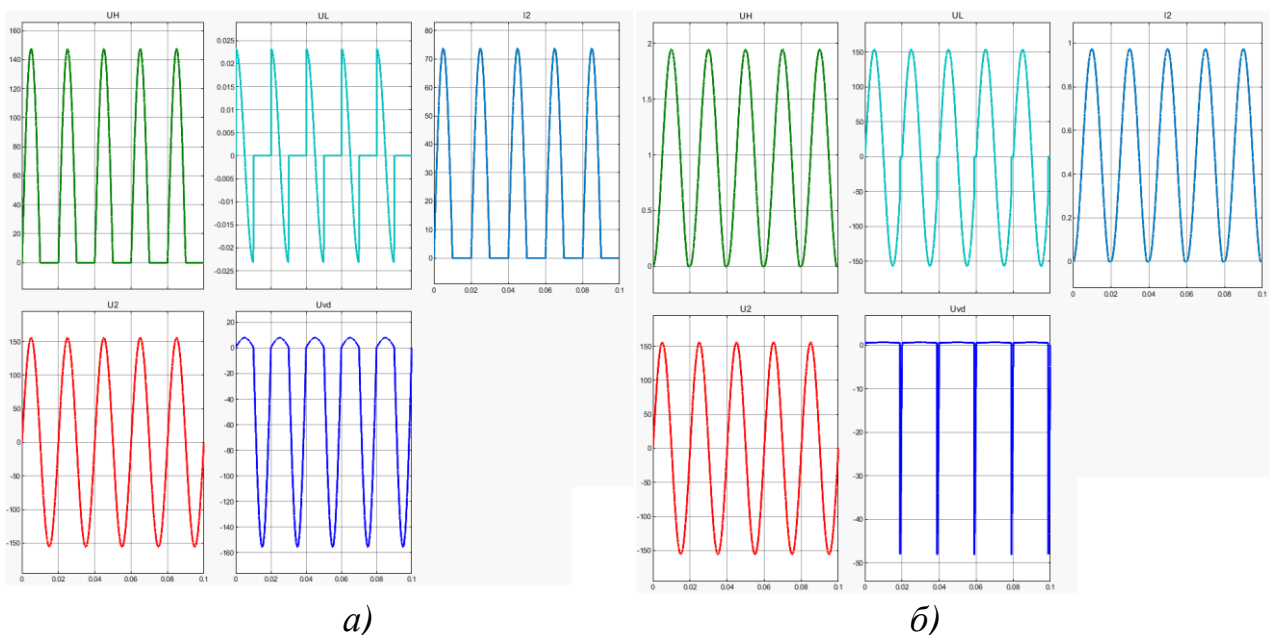


Рисунок 2 – Осцилограми струмів і напруг при $L_H = 1$ мкГн (а) та 1 Гн (б)

В табл. 1 представлено параметри, визначені на основі аналізу осцилограм, що відповідають різним значенням індуктивності навантаження в діапазоні від 1 мкГн до 1 Гн.

Таблиця 1

**Результати дослідження впливу індуктивності на параметри
однофазного однопівперіодного випрямляча**

№ досліджу	L_H , Гн	R_H , Ом	τ_H , с	T , с	U_{2m} , В	λ_{VS} , рад.	U_d , В
1	10^{-6}	2	$0,5 \cdot 10^{-6}$	0,02	156	3,14	49,68
2	10^{-3}		$0,5 \cdot 10^{-3}$			3,45	48,48
3	10^{-2}		$0,5 \cdot 10^{-2}$			4,08	39,52
4	0,1		0,05			4,24	36,17
5	0,2		0,1			5,34	10,25
6	0,3		0,15			5,65	4,45
7	1		0,5			6,28	0,0001

Як слідує з аналізу даних, представлених в табл. 1, при незначних індуктивностях середнє значення випрямленої напруги є найбільшим і практично співпадає з варіантом роботи випрямляча на активне навантаження. По мірі збільшення постійної часу τ_H відбувається поступове зменшення U_d , і при $\tau_H \gg T$ середнє значення випрямленої напруги на активному опорі різко падає, що відповідає теоретичним уявленням про перебіг фізичних процесів в однофазному однопівперіодному випрямлячі.

Розроблену Simulink-модель однофазного однопівперіодного випрямляча з активно-індуктивним навантаженням впроваджено в навчальний процес Херсонського національного технічного університету в якості он-лайн лабораторної роботи з дисципліни «Силовa електроніка» для студентів спеціальності G3. Електрична інженерія.

Список літератури:

1. Simulink MathWorks [Electronic resource] / Math Works [Site]. – Access mode: https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=hp_products_simulink/ (last access: 24.01.2025). – Title from the screen.
2. Ромашко В.Я. Силові електронні прилади та пристрої: Навч. пос. / В.Я. Ромашко, Л.М. Батрак. – К.: КПІ ім. І. Сікорського. – 119 с.
3. Електроніка і мікросхемотехніка: У 4-х т. Т.4. Книга 1. Силовa електроніка / За ред. В.І. Сенька. – К.: Каравела, 2012. – 640 с.

УДК 621.3

МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВКРОКОВОГО РЕЖИМУ КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНОГО КРОКОВОГО ДВИГУНА У MATLAB

Коваленко О.Ю., Коваль В.В., 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.

Сучасні технології керування електричними машинами займають важливе місце у сфері автоматизації, робототехніки та електромеханічних систем. Одним із ключових елементів таких систем є крокові двигуни (КД), які забезпечують точне позиціонування та управління рухом. Вони широко застосовуються в числовому програмному управлінні, 3D-принтерах, медичному обладнанні, автоматичних системах дозування та багатьох інших пристроях, що потребують високої точності переміщення.

Проте ефективне використання крокових двигунів залежить від правильного вибору типу двигуна, методу керування та розрахунку його характеристик. У зв'язку з цим моделювання таких двигунів дозволяє детально дослідити їхню роботу, оцінити динамічні характеристики та оптимізувати параметри управління.

Одним із найпотужніших інструментів для математичного моделювання є середовище Matlab/Simulink, яке надає широкі можливості для створення, аналізу та оптимізації електромеханічних систем. Його використання дозволяє відтворювати роботу крокових двигунів у різних режимах, аналізувати їхні характеристики та оцінювати ефективність керування без необхідності створення фізичних прототипів.

Метою роботи є моделювання та дослідження напівкрокового режиму керування трифазного крокового двигуна у середовищі Matlab/Simulink для визначення його динамічних характеристик та оптимізації керування.

У табл.1 наведено перелік використаних блоків Simulink для моделювання.

Таблиця 1

Блоки Matlab/Simulink, які використовуються у модельному експерименті

Бібліотека	Назва блоку	Призначення
Simscape	Stepper Motor	моделює процеси у КД
Simscape	Ideal Switch	перемикач живлення фаз КД
Simscape	DC Voltage Source	постійна напруга живлення
Simulink	Pulse Generator	задає час включення кожної фази КД
Simulink	Scope	відображення часових залежностей
Simulink	Demux	виводить окремі сигнали
Simulink	Gain	множення вхідних даних на число
Simulink	Constant	генерує постійне вхідне значення
Simscape	powergui	вибір методу розв'язку

Схема віртуального експерименту у Matlab/Simulink з дослідження напівкрокового режиму керування трифазного КД [1], зображена на рис. 1.

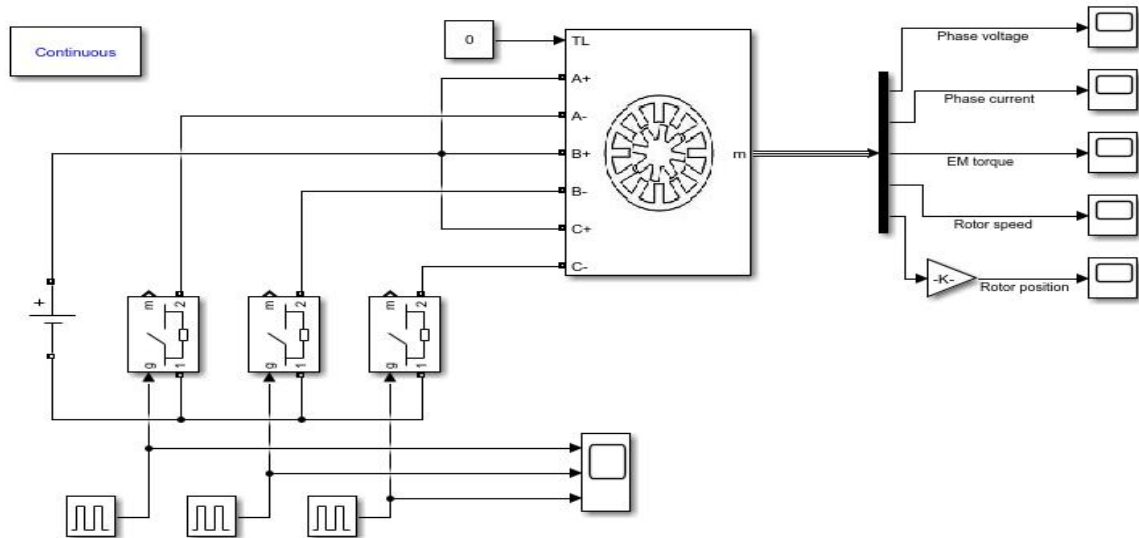


Рисунок 1 – Simulink-модель для дослідження напівкрокового режиму керування трифазного КД

При напівкроковому режимі керування двигун робить крок в половину основного. Цей метод керування достатньо поширений, оскільки двигун з меншим кроком дає можливість отримання від 100 кроків до 200 кроків на оберт вала двигуна. При кожному кроці живиться лише одна фаза, а в інших випадках живляться дві фази (рис.2) [2].

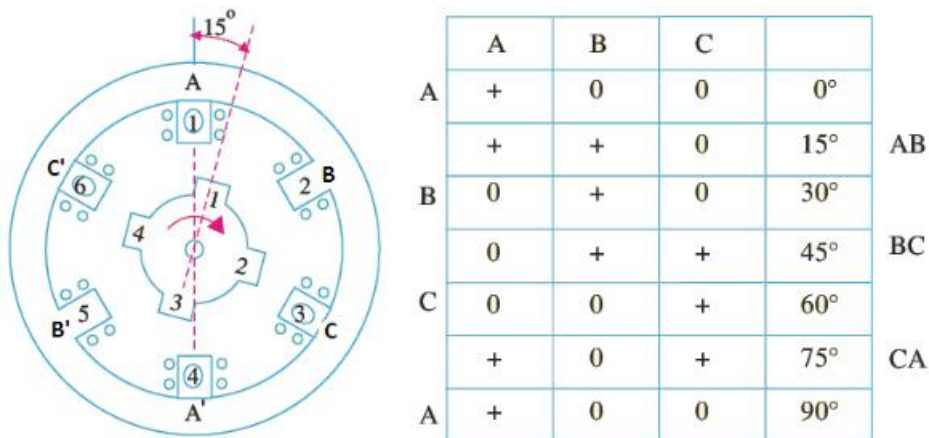


Рисунок 2 – Напівкроковий режим керування трифазним КД

Напівкроковий режим забезпечує підвищену роздільну здатність без необхідності використання дорожчих двигунів. У разі виникнення резонансу втрата моменту є частковою, проте зазвичай не перешкоджає нормальному функціонуванню приводу. Разом із тим, значним недоліком напівкрокового режиму є нерівномірність моменту на різних етапах роботи. У положеннях ротора, де активується лише одна фаза, момент становить приблизно 70% від

значення, яке досягається при одночасному збудженні двох фаз. Це спричиняє коливання моменту, що може сприяти підвищенню рівня вібрацій і шуму [2].

Таблиця 2

Параметри моделі крокового двигуна

Тип двигуна	зі змінним магнітним опором
Кількість фаз	3
Максимальна індуктивність обмотки, Гн	0.01
Мінімальна індуктивність обмотки, Гн	0.002
Опір обмотки, Ом	1.2
Кут кроку, град.	30
Повний момент інерції, кг·м ²	$2 \cdot 10^{-5}$
Загальний коефіцієнт тертя, Н·м·с	0.001
Початкова швидкість, рад/с	0
Початкове положення, град.	0
Напруга живлення фаз, В	25

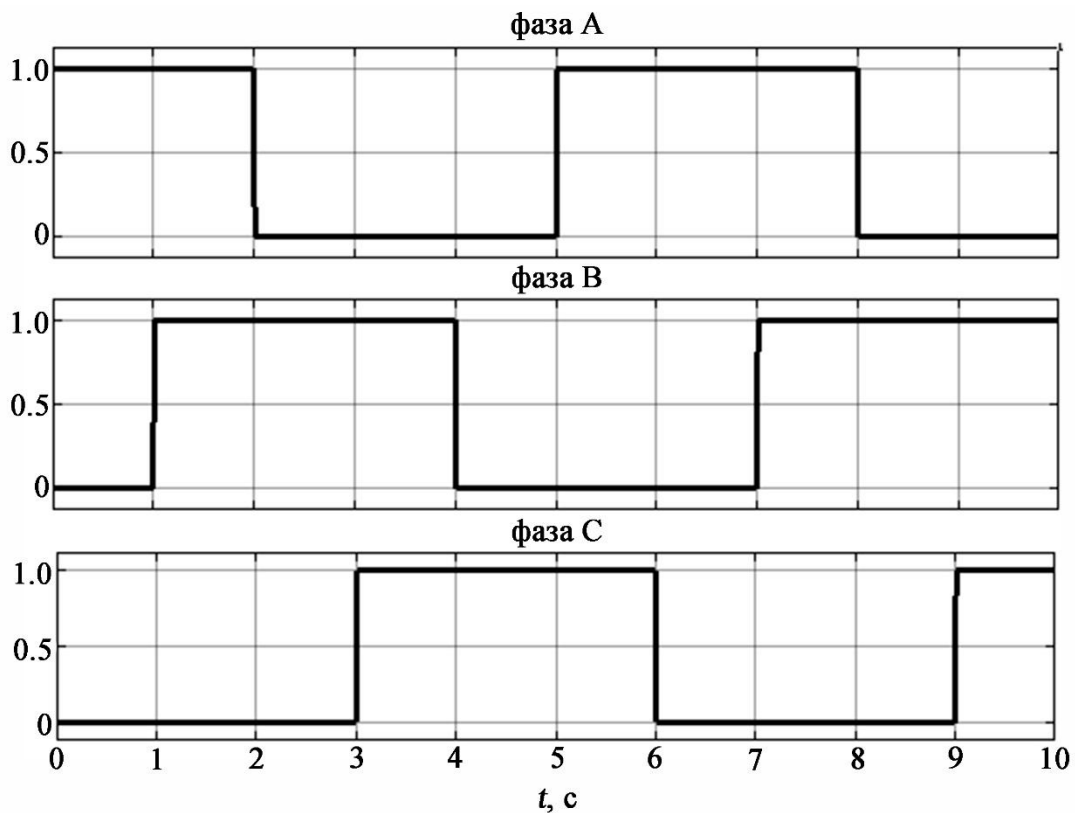


Рисунок 3 – Алгоритм роботи блоків Pulse Generator та Ideal Switch для підключення напруги живлення фаз крокового двигуна

Моделювання проводиться протягом часу $t = 10$ с. Використовується джерело постійної напруги 25 В, яке згідно алгоритму, представленому на рис. 3 та реалізованого за допомогою спільної роботи блоків Pulse Generator та Ideal Switch, подається на фази крокового двигуна. На рис. 4 представлено

залежність кута повороту θ вала крокового двигуна від часу, а також показані фази, які підключені на кожному кроці.

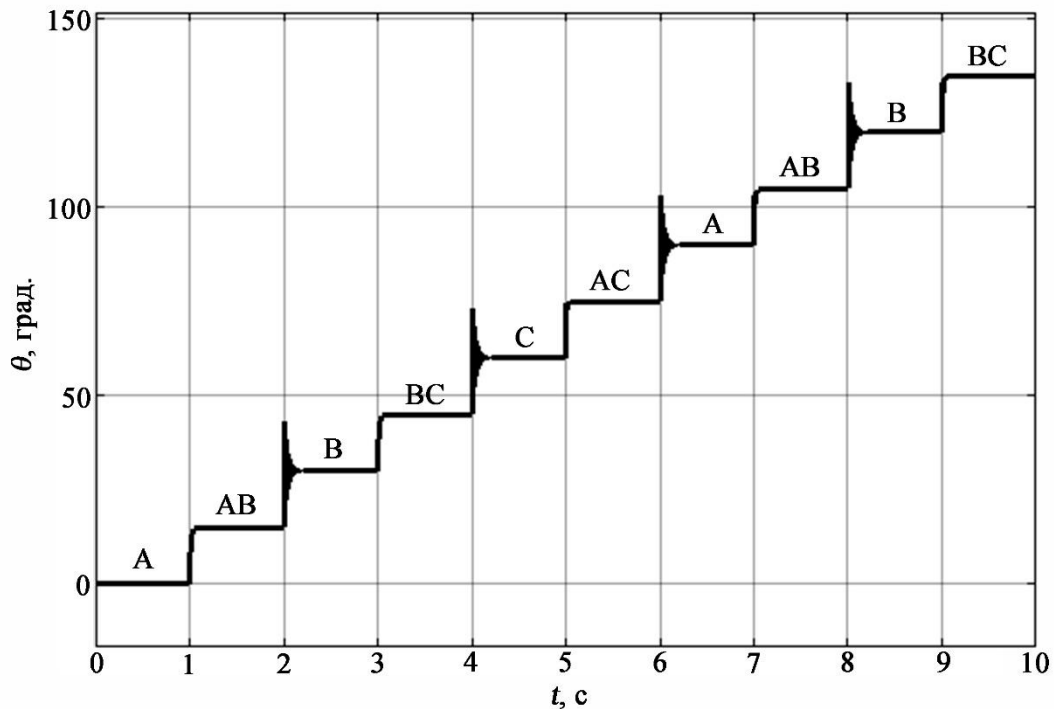


Рисунок 4 – Часова залежність кута повороту вала крокового двигуна при заданому алгоритмі живлення фаз, що відповідає напівкроковому режиму

При проведенні дослідження було порівняно різні типи живлення крокового двигуна. Встановлено, що форма струму для ключового живлення має найменший рівень пульсації моменту, тому використання такого виду живлення є доцільним для поставленої задачі.

Використання розробленої моделі дозволяє значно прискорити модельний експеримент при проектуванні мехатронних систем позиціонування. Запропонована модель КД також може бути використана в учбовому процесі при створенні віртуальних лабораторних робіт електротехнічного напрямку.

Список літератури:

1. Mathworks Model Stepper Motor. Mathworks Documentation. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/steppermotor.html>. – Title from the screen.
2. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни "Спеціальні електричні машини" для студентів напряму підготовки "Електромеханіка" на тему: "Дослідження крокового двигуна". / Уклад. М.П. Розводюк, М.О. Казак. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 37 с.

УДК 621.31

СИСТЕМА ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ З ПОДВІЙНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ, ПОБУДОВАНА НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ РЕЛЕ

К.т.н., доц. Курак В.В., Гайко О.М., Смешко А.А.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
vk_74@ukr.net

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

Економію енергії, що споживається із загальної електричної мережі, можна забезпечити при використанні систем з альтернативними джерелами живлення, зокрема тих, що побудовані на основі відновлюваної енергетики.

В даній роботі запропоновано схему системи зовнішнього освітлення, що передбачає можливість живлення як безпосередньо від централізованої мережі електропостачання, так і за рахунок енергії, накопиченої в акумуляторній батареї (АКБ), заряджання якої може відбуватися, зокрема, від автономної сонячної або вітроелектричної установки.

Схему розробленої системи зовнішнього освітлення, основним призначенням якої є зменшення споживання об'єктом мережевої електричної енергії, представлено на рис. 1.

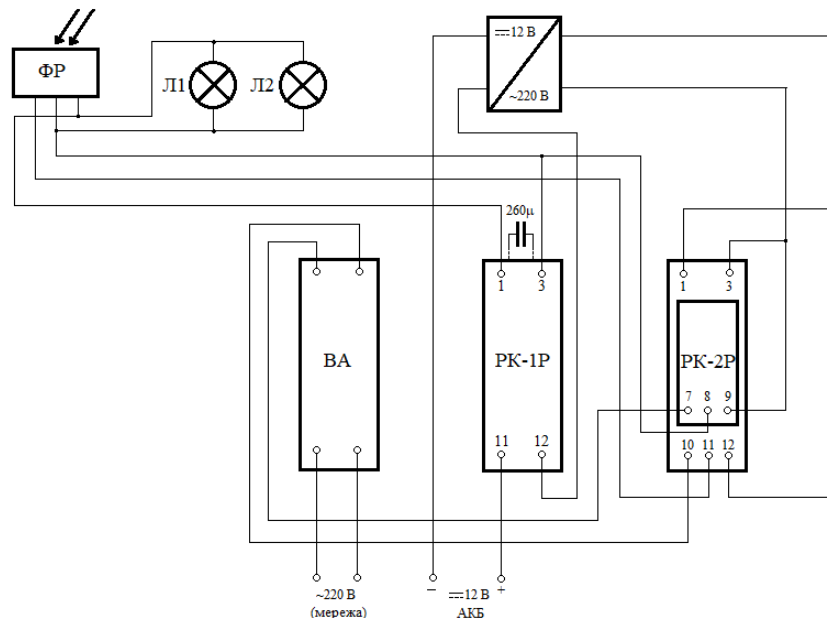


Рисунок 1 – Схема системи зовнішнього освітлення з подвійним джерелом живлення на основі реле РК-1Р та РК-2Р

Систему побудовано на двох електромагнітних реле РК-1Р [1] та РК-2Р [2], інверторі, що перетворює постійну напругу 12 В у змінну 220 В, та фотореле ФР. Принцип її роботи полягає у наступному.

Мережева напруга через автоматичний вимикач ВА та нормально замкнені

пари контактів 7-8 та 10-11 реле РК-2Р подається на фотореле ФР. При зменшенні освітленості фотодатчика реле ФР до рівня спрацювання, воно подає напругу від централізованої електромережі до прожекторів Л1 та Л2, поява якої призводить до спрацювання електромагніту реле РК-1Р і замикання його нормально розімкнутих контактів 11-12. В результаті спрацювання реле РК-1Р на інвертор подається напруга від акумуляторної батареї АКБ, інвертор запускається і на його виході з'являється змінна напруга 220 В. Поява цієї напруги на електромагніті реле РК-2Р призводить до перекомутації схеми, в результаті якої контакти 7-8 та 10-11 розмикаються, а замикаються пари контактів 8-9 та 11-12, зовнішня мережа від'єднується від системи і прожектори починають отримувати живлення від акумулятора через інвертор. При зниженні напруги на АКБ до рівня розрядженого стану, інвертор вимикається і система повертається до живлення від загальної електромережі.

Оскільки час перемикавання реле РК-1Р та РК-2Р є близьким і становить порядку 40 мс, то для підтримання реле РК-1Р у спрацьованому стані під час перекомутації контактів реле РК-2Р, в наслідок якої напруга на освітлювальній установці короткочасно зникає, до електромагніту реле РК-1Р підключено конденсатор ємністю 260 мкФ, заряду якого вистачає для підтримання достатнього рівня напруги на котушці протягом приблизно 1 с.

Розроблену схему покладено в основу системи освітлення підвір'я І корпусу Херсонського національного технічного університету (ХНТУ). Заряджання АКБ протягом світлого періоду доби організовано від автономної фотоелектричної станції. В якості освітлювальної установки використовувались два світлодіодних прожектори (рис. 2).

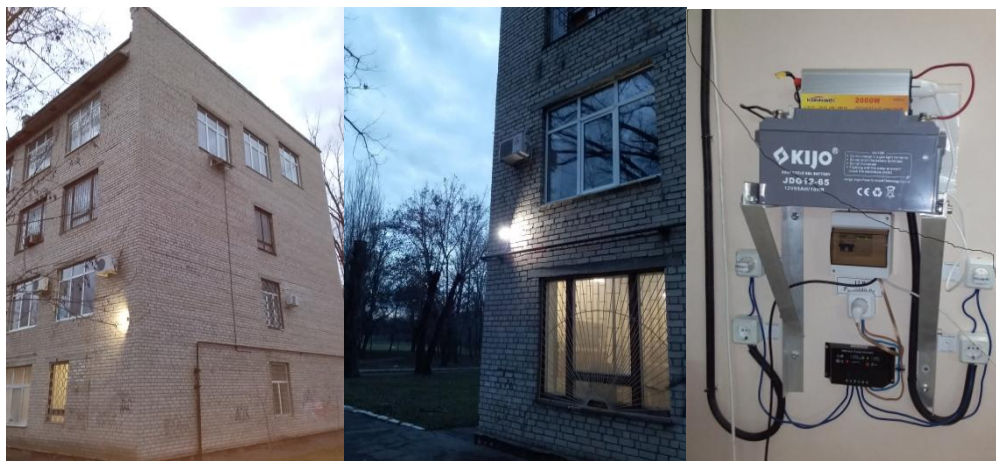


Рисунок 2 – Реалізація системи вуличного освітлення в ХНТУ

Список літератури:

1. Допоміжне реле F&F РК-1Р-230V [Електронний ресурс] / Axiomplus [Сайт]. – Режим доступу: <https://axiomplus.com.ua/ua/vspomogatelnye-rele/product-35037/> (дата звернення: 30.04.2025). – Назва з екрану.
2. Електромагнітне реле РК-2Р-230V [Електронний ресурс] / Електросвіт [Сайт]. – Режим доступу: <https://es.ua/668-pk-2p-230v> (дата звернення: 1.05.2025). – Назва з екрану.

УДК [511::003.26]::[004.056.5::621.3]

ЦІЛІ КОМПЛЕКСНІ ЧИСЛА В ЗАДАЧАХ КІБЕРЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

В'юнник С.Є.

Харківський національний університет міського господарства

імені О.М. Бекетова, м. Харків

sofayaayaaaaa@gmail.com

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

Електроенергетична система України функціонує при значних збуреннях в її роботі. Загрози та напади на важливі об'єкти енергетичної інфраструктури з кіберпростору зростають у міру розвитку технологій, чим неодмінно користується ворог [1]. Україна останніми роками [2] зазнала та оговталася від наслідків численних потужних ударів: кібератака троянської програми BlackEnergy на «Прикарпаттяобленерго», «Чернівціобленерго» та «Київобленерго» у грудні 2015 р., на «Укренерго» у грудні 2016 р., бекдор-атака М.Е.Дос у квітні 2017 р., масштабна атака черв'яка NotPetya у червні 2017 р. тощо. В умовах воєнного стану проблеми кібербезпеки загострюються [1], що стимулює наукові дослідження у відповідних сферах для забезпечення здатності створити надійну та стійку енергетичну систему, яка задовольняє щоденні потреби людей та підприємств. Короткострокова енергетична безпека зосереджена на гнучкості системи у реагуванні на зміни попиту та пропозиції, а довгострокова енергетична безпека передбачає інвестиції в безпеку постачання та її зв'язок з економічним прогресом при жорстких екологічних вимогах.

Поверхня кібератак [3, 4], яка характеризує кількість можливих шляхів проникнення для зловмисників, постійно розширюється, оскільки все більше систем об'єднуються в мережу та залежать від цифрових технологій. Складні мережі інтелектуальних лічильників, датчиків та автоматизованих систем управління є необхідними складовими сучасних енергетичних об'єктів. Якщо вони недостатньо захищені, кіберзлочинці можуть переривати роботу, красти дані або змінювати потоки енергії, зосереджуючись на слабких ділянках. Розповсюдження розподілених джерел і споживачів електроенергії, таких як малопотужні гібридні генератори, сонячні панелі та електромобілі, також підвищує ймовірність виникнення безпекових проблем. Високий ступінь автоматизації та оперативна обробка даних у режимі реального часу максимізує ефективність мережі, проте створює додаткові загрози для її надійності. Масові відключення електроенергії, відмови обладнання або грошові втрати можуть бути наслідком кібератаки, яка змінює дані або порушує автоматичні процеси. Ще однією зростаючою загрозою виступають вразливості в ланцюжку поставок: вітчизняна електроенергетика стає все більш залежною від імпорту обладнання, хмарних сервісів та стороннього програмного забезпечення. Критично важливі функції електропостачання опиняться під загрозою, якщо ці сторонні системи будуть пошкоджені.

Використання криптографічних методів у сукупності з технічними й організаційними заходами забезпечує надійний захист електроенергетики від широкого спектра кіберзагроз. Перспективний напрямок розробки ефективних методів криптографії – залучення теорії комплексних чисел і комплексних функцій у поєднанні з уже освоєним практикуючими криптографами математичним інструментарієм, зокрема – модулярною арифметикою і лінійною алгеброю [3, 4]. Необхідно акцентувати увагу на важливих моментах при переході у математичних об'єктах від дійсних до комплексних чисел, серед яких для криптографії особливе значення мають гаусові цілі числа [5].

Гаусові цілі числа (гаусові числа, цілі комплексні числа) – це комплексні числа, у яких дійсна та уявна частини – звичайні цілі числа. Множина всіх гаусових чисел $Z[i] = \{z \mid z = a + bi; a, b \in \mathbb{Z}; i^2 = -1\}$ включає, як підмножину, всі звичайні цілі числа: $\mathbb{Z} \subset Z[i]$. Властивості цілих комплексних чисел схожі на властивості звичайних цілих чисел, проте є й суттєві відмінності. Зокрема, ввести в $Z[i]$ впорядкованість, на відміну від $\mathbb{Z}$, неможливо.

Норма $N(z) = |z|^2 = z\bar{z} = a^2 + b^2$ гаусового числа $z = a + bi$ дорівнює нулю тільки для нуля, а в інших випадках є додатним цілим числом. Ділення націло цілих комплексних чисел визначається звичайним чином з використанням традиційної термінології. Кількість дільників гаусового числа завжди скінченна, а кількість кратних – нескінченна. Довільне гаусове число z , відмінне від дільників одиниці $\{1, -1, i, -i\}$, має як мінімум 8 тривіальних дільників: 4 дільника одиниці і 4 їх добутку на саме це число z .

Число $z \neq 0$ називається простим, якщо воно не має інших дільників, окрім восьми тривіальних дільників, а в іншому разі – складеним. Якщо норма $N(z)$ гаусового числа – просте число, то і саме це число z є простим.

Два гаусових числа u і v називаються асоційованими, якщо одне виходить з іншого множенням на дільник одиниці, тобто для деякого $k \in \{0, 1, 2, 3\}$ справджується рівність $u = i^k v$. У кожного ненульового цілого комплексного числа z є три асоційованих з ним. Норми всіх чотирьох асоційованих між собою чисел співпадають. Кожне гаусове число z , відмінне від нуля та дільників одиниці, можна розвинути на прості множники, причому це розвинення єдине з точністю до порядку й асоційованості множників:

$z = i^k \prod_{l=1}^n p_l^{n_l}$, де p_l , $l = \overline{1, n}$ – суттєво різні прості дільники числа z ;

$k \in \{0, 1, 2, 3\}$; n і n_l , $l = \overline{1, n}$ – невід'ємні цілі числа. Для здійснення розвинення можна використовувати наступне: усі дільники гаусового числа z також слугують дільниками його норми $N(z)$. При цьому норма $N(z)$ містить «зайві» прості множники, що відповідають комплексно спряженому числу $\bar{z}$.

У множині $Z[i]$ можна визначити ділення із залишком на будь-яке ненульове гаусове число з вимогою, що норма залишку менша норми дільника. За частку s можна взяти гаусове число, що є найближчим до частки від звичайного ділення комплексних чисел u на v .

Нехай w – деяке ненульове гаусове число. Два гаусових числа u і v називаються порівнянними за модулем w , якщо їхня різниця $u - v$ ділиться націло на w : $u \equiv v \pmod{w}$. Відношення порівнянності є еквівалентністю, тому множина $Z[i]$ розбивається на неперетинні класи лишок, де кожний клас містить усі порівнянні один з одним (за даним модулем) гаусові числа. Для цих класів визначаються, спираючись на звичайні цілі числа, операції додавання і множення. Отримане кільце лишок за гаусовим модулем w містить $N(w)$ елементів. Відповідно модифікуються деякі класичні результати модулярної арифметики: мала теорема Ферма, властивості класу лишок за модулем, функція і теорема Ейлера тощо.

Найбільшим спільним дільником $НСД(u, v)$ для гаусових чисел u і v , хоча б одне з яких відмінне від нуля, називається їхній спільний дільник, що ділиться на будь-який інший спільний дільник u і v . $D = НСД(u, v)$ визначений однозначно з точністю до дільників одиниці, тобто найбільшими спільними дільниками також будуть асоційовані з D числа. Числа u і v – взаємно прості тоді і тільки тоді, коли їхній $НСД(u, v)$ дорівнює одному з дільників одиниці. Для знаходження $НСД(u, v)$ для цілих комплексних чисел u і v , відмінних від нуля, можна скористатися алгоритмом Евкліда. При цьому $НСД$ одержується як останній ненульовий залишок.

Для комплексних векторів і матриць додавання (віднімання) здійснюється, як і в дійсному випадку, поелементно. Узагальненням скалярного добутку на випадок двох векторів x і y з комплексними елементами слугує ермітів скалярний добуток (x, y) [6]: $(x, y) = y^* x$, де $y^* = \bar{y}^T$ – вектор, ермітово спряжений до вектора y . Оскільки кожне дійсне число є комплексно спряженим із самим собою, це нове визначення скалярного добутку включає його дійсний аналог. Відповідно модуль $|z|$ комплексного вектору z задається формулою: $|z| = \sqrt{z^* z}$. Поняття ермітова скалярного добутку можна поширити [6] на комплексні матриці X і Y однакового розміру: $(X, Y) = Sp(Y^* X)$, де $Y^* = \bar{Y}^T$ – матриця, ермітово спряжена до матриці Y ; $Sp(A)$ – слід квадратної матриці A . Останнє визначення добутку охоплює векторний випадок, якщо розглядати вектор z як матрицю-стовпець. Відповідно норма $\|Z\|$ комплексної матриці Z задається формулою: $\|Z\| = \sqrt{Sp(Z^* Z)}$.

При здійсненні шифрування на основі еліптичних кривих і криптоаналізу використовуються скалярні та матричні обчислення, де можна задіяти цілі комплексні числа [7]. Застосовуючи модулярні операції над об'єктами з гаусовими числами, можна створювати ефективні криптографічні ключі. Ключова матриця – найважливіша частина шифрування. Повідомлення, що зашифровані з використанням ключової матриці, розшифровують за допомогою оберненої до неї матриці. Усі перехоплені повідомлення можна легко розшифрувати, якщо знайдена сама матриця ключа або до неї обернена.

Лінійні алгебраїчні методи використовуються в криптографічних атаках, які блокують шифри, такі як AES, спираючись, зокрема, на вектори ймовірності та лінійні наближення. Їх можна модифікувати, замінюючи цілочислові об'єкти на структури з гаусовими числами.

Потребують деталізації перспективи застосування в криптографії апарату комплексного аналізу, зокрема модулярної арифметики з цілими комплексними числами. Подальші дослідження передбачають вивчення обчислювальних процедур над векторами і матрицями з гаусовими елементами з точки зору оптимізації витрат комп'ютерних ресурсів та їх реалізацію на базі сучасних програмних середовищ, що використовуються в організаціях енергетичної інфраструктури.

Список літератури:

1. Готовність України до нових викликів. Кібербезпека і зв'язок [Електронний ресурс]. Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України. – Режим доступу: <https://cip.gov.ua/ua/news/gotovnist-ukrayini-do-novikh-viklikiv-kiberbezpeka-i-zvyazok> (дата звернення: 24.01.2025). – Назва з екрана.
2. Alekseichuk L. Cyber Security Logical and Probabilistic Model of a Critical Infrastructure Facility in the Electric Energy Industry / L. Alekseichuk, O. Novikov, A. Rodionov, D. Yakobchuk // Theoretical and Applied Cybersecurity. – 2023. – Vol. 5, No. 1. – P. 61–66.
3. Кібербезпека: основи кодування та криптографії: навч. посібник / С.П. Євсєєв [та ін.]. – Харків: Новий Світ-2000, 2023. – 657 с.
4. van Tilborg H.C.A. Fundamentals of cryptology. A Professional Reference and Interactive Tutorial [Electronic resource] / Henk C.A. van Tilborg; Eindhoven University of Technology, The Netherlands. – Kluwer academic publishers Boston/Dordrecht/London, 2014. – 491 p. – Access mode: <https://www.hyperelliptic.org/tanja/teaching/cryptoI13/cryptodict.pdf> (last access: 15.02.2025) – Title from the screen.
5. Molelekeng B.T. Arithmetic in the ring of Gaussian integers [Electronic resource] / B.T. Molelekeng, A.O. Munagi // A research report submitted to the School of Mathematics, Faculty of Science, University of Witwatersrand, RSA. – 2022. – 80 p. – Access mode: <https://wiredspace.wits.ac.za/bitstreams/a80b572b-7cc4-4d66-aedf-52c65ca9c433/download> (last access: 18.01.2025). – Title from the screen.
6. Гантмахер Ф.Р. Теорія матриць [Електронний ресурс] / Ф.Р. Гантмахер 2025. – 757 с. – Access mode: <https://nebayduzhi-math.azurewebsites.net/%D0%93%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BC%D0%B0%D1%85%D0%B5%D1%80%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%8F%D0%9C%D0%B0%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%86%D1%8C> (дата звернення: 12.02.2025). – Назва з екрана.
7. Shuai L. A Group-Based NTRU-Like Public-Key Cryptosystem for IoT / L. Shuai, H. Xu, L. Miao, X. Zhou // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 75732–75740.

УДК 621.311

СУЧАСНА КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ: ТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ І РИНКОВІ ПЕРСПЕКТИВИ

Аспірант Чайка Д.А.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро
chaika.d.a@nmu.one

Науковий керівник: PhD, доц. Циган П.С.

Фотоелектричні модулі - це електронні пристрої, які приймають сонячне світло і перетворюють його безпосередньо в електрику. Фотоелектричний модуль складається з елементів, геометрична форма яких залежить від типу кремнію: у разі використання монокристалічного кремнію елементи мають восьмикутну форму, тоді як при застосуванні полікристалічного кремнію — квадратну. Подібно до елементів живлення, елементи сонячних панелей призначені для виробництва електроенергії, але в той час як елементи живлення виробляють електроенергію з хімічних речовин, елементи сонячних панелей генерують електроенергію, вловлюючи сонячне світло[1].

Виділяють три основні типи сонячних панелей: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові панелі. Монокристалічні фотоелектричні модулі виготовляють з монокристалу кремнію, тому вони коштують найдорожче за інших, мають форму квадрата зі зрізаними кутами, високу ефективність. Ці панелі мають найвищий ККД, який тримається на рівні 22% за умови перпендикулярного падіння сонячних променів та тривалий термін служби 25 років. Монокристалічні сонячні панелі є найдорожчими і в той же час найефективнішими, з точки зору кількості кВт отриманих з одиниці площі. Процес виробництва монокристалічних панелей коштує дорожче, оскільки в ньому використовується високоочищений кремній. Це забезпечує високі показники ККД, довговічність і компактні розміри батареї, але підвищує їх ціну та зменшує доступність для широкого споживача. Однак, інвестування в такі технології може бути вигідним у довгостроковій перспективі, оскільки висока ефективність перетворення сонячної енергії дозволяє зменшити загальні витрати на електроенергію протягом усього терміну експлуатації. Це робить їх ідеальними для використання в міських умовах, де територія часто є обмеженим ресурсом. Крім того, зростаючий попит на відновлювальні джерела енергії та програми державної підтримки сприяють розвитку ринку сонячних панелей. У результаті виробники можуть знижувати витрати на виробництво завдяки впровадженню нових технологій та оптимізації процесів. З часом це може призвести до зниження цін на монокристалічні панелі, що зробить їх більш доступними для кінцевого споживача. Спосіб монтажу монокристалічних панелей також грає важливу роль в їхньому загальному ефективному використанні. Завдяки своїй легкості та компактності, ці панелі можуть бути встановлені на дахах будівель, що дозволяє максимально використовувати доступний простір для збору сонячної енергії. Правильний монтаж є критично

важливим для забезпечення оптимального кута нахилу, що дозволяє максимізувати поглинання сонячних променів протягом дня. Крім цього, важливо враховувати фактори оточення при встановленні панелей. Наприклад, тіні від дерев або сусідніх будівель можуть суттєво зменшити ефективність роботи сонячної системи.

Полікристалічні сонячні батареї виготовляються з полікристалічних елементів квадратної форми. Така форма обумовлена особливостями кристалізації кремнію під час виробничого процесу, коли розплавлений кремній охолоджується в формах, утворюючи множинні кристалічні зерна. Це призводить до природного утворення квадратних елементів, що спрощує їх розкрій та компонування в модулі. Важливою перевагою є те, що процес виробництва є простішим і дешевшим, що знижує ціну полікристалічних сонячних панелей. Однак, разом зі зниженням вартості, знижується і ефективність, приблизно до 18%. Це пов'язано з меншою чистотою кремнію. Нижча ефективність означає, що для генерації тієї ж кількості електроенергії потрібно більше систем і більше місця для сонячних електростанцій. Полікристалічні сонячні панелі втрачають до 30% своєї ефективності після 25 років використання. Полікристалічні сонячні батареї, незважаючи на свої недоліки, користуються популярністю завдяки своїй доступності та простоті установки. Процес монтажу таких панелей є досить гнучким, оскільки вони можуть бути встановлені на різних типах дахів і навіть на землі[2]. Перед початком монтажу важливо провести детальну оцінку місця розташування: забезпечити достатній рівень сонячного освітлення та врахувати можливість затінення від дерев або інших будівель. Установка полікристалічних панелей зазвичай передбачає використання спеціальних кріплень і каркасів, які забезпечують надійне закріплення елементів. Це дозволяє не лише оптимізувати їх положення для максимального поглинання сонячної енергії, але й забезпечити стійкість до погодних умов. Важливо також дотримуватись всіх електричних норм під час підключення системи до мережі. Після завершення монтажу рекомендується провести тестування системи для перевірки її ефективності та коректності роботи всіх компонентів. Крім того, регулярний моніторинг і обслуговування допоможуть підтримувати продуктивність полікристалічних батарей протягом тривалого часу, також слід пам'ятати про необхідність очищення поверхні панелей від пилу та бруду для збереження їхньої ефективності впродовж усього терміну експлуатації.

Тонкоплівкові сонячні панелі є найдешевшими, але й найменш ефективними: їх ККД становить лише 10-12%, а термін служби набагато коротший, ніж у двох інших типів. Цей тип сонячних панелей найлегший за вагою, оскільки складається з тонкого шару кремнію, прикріпленого до основи з фольги або скла. Через меншу продуктивність вони займають більшу площу, а вартість допоміжних матеріалів, таких як системи кріплення, є вищою. Однак, тонкоплівкові панелі мають свої переваги, зокрема, гнучкість у застосуванні та можливість установки на нестандартних поверхнях. Їх легка вага дозволяє монтувати їх навіть на дахах з низькою несучою спроможністю або в умовах обмеженого простору. Крім того, тонкоплівкові сонячні батареї менш чутливі

до температурних коливань і затінення, що робить їх більш універсальними для використання в різних кліматичних умовах. Це може бути особливо корисним у регіонах з частими змінами погоди або при розміщенні панелей поруч із великими деревами чи будівлями. Вибір між полікристалічними та тонкоплівковими панелями залежить від багатьох факторів: бюджету, доступного простору для установки та специфічних потреб споживача.

Станом на 2025 рік світовий ринок сонячних модулів демонструє значні зміни як у структурі технологій, так і в напрямках розвитку. Монокристалічні кремнієві модулі домінують на ринку, займаючи близько 90% глобального обсягу виробництва. Полікристалічні модулі поступово втрачають позиції через нижчий ККД та зменшення вартості монокристалічних аналогів.

Найбільші виробники фотоелектричних модулів (ФЕМ) розташовані переважно в Китаї, США та Канаді. Їхні ринкові позиції регулярно переглядаються та публікуються щокварталу аналітичним агентством Bloomberg. Одними з передових компаній за виробленою річною потужністю є Longi Solar (120 000 МВт/рік), Jinko Solar (110 000 МВт/рік), JA Solar (95 000 МВт/рік), Trina (95 000 МВт/рік).

Розглянемо порівняльну таблицю поширених сонячних панелей потужністю 420 Вт, які використовуються в побутових системах та малому бізнесі (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна таблиця сонячних панелей

Назва бренду	Longi Solar	Jinko Solar	JA Solar	Trina
Країна виробник	Китай	Китай	Китай	Китай
Потужність, Вт	420	420	420	420
Напруга при макс. потужності, В	32.76	31.51	31.11	41.3
Тип фотомодуля	Монокристал	Монокристал	Монокристал	Монокристал
ККД, %	21.5%	21.5%	21%	21%
Кількість елементів	108	108	108	144
Вага, кг	20.8	22	20	21.8
Максимальна робоча температура, °C	-40...+85	-40...+85	-40...+85	-40...+85
Вартість, грн	2677[3]	4500[4]	3089[5]	4746[6]

На основі аналізу технічних характеристик та вартості сонячних панелей чотирьох провідних брендів можна зробити висновок, що всі розглянуті моделі є високоефективними монокристалічними модулями з однаковою потужністю 420 Вт та широким температурним діапазоном експлуатації. Найвищий показник ККД мають панелі Longi Solar та Jinko Solar (21.5%), однак модель Longi Solar має суттєву перевагу у вартості, що робить її найбільш економічно доцільним вибором. Панель Trina, хоч і має найвищу напругу та більшу кількість елементів, значно поступається конкурентам за показником ціни, що

знижує її привабливість з точки зору співвідношення ціна/ефективність. Отже, оптимальним вибором для споживача, який прагне ефективного та доступного рішення, є модуль Longi Solar.

У тезах було розглянуто основні типи сонячних панелей – монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові, а також здійснено порівняльний аналіз технічних характеристик популярних моделей. Встановлено, що монокристалічні модулі є найефективнішими за показником ККД, мають тривалий термін експлуатації та компактні розміри, однак є найдорожчими. Полікристалічні панелі характеризуються нижчою вартістю, але поступаються в ефективності та довговічності. Тонкоплівкові панелі мають найнижчий ККД, але вирізняються легкістю та гнучкістю в монтажі.

На світовому ринку спостерігається чітка тенденція домінування монокристалічних технологій, які наразі охоплюють понад 90% загального виробництва. Особливо активним є впровадження нових технологій на основі p-типу кремнію (TOPCon, HJT), що сприяє подальшому зростанню ефективності модулів. Паралельно розвиваються інноваційні рішення, зокрема біфасіальні панелі.

Загалом, ринок сонячної енергетики демонструє сталу динаміку розвитку, орієнтуючись на підвищення ефективності, зниження вартості та розширення сфер застосування фотоелектричних модулів.

Список літератури:

1. Колонтаєвський Ю.П. Фотоенергетика: навч. посібник / 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.
2. Зорін В.В. Електричні мережі та системи (окремі розділи): навчальний посібник для студентів вищ. техн. навч. закл / В.В. Зорін, Є.А. Штогрин, Р.О. Буйний. – Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. – 248 с.
3. Сонячна панель Longi Solar LR5-54HTB-420M, 420Вт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-panels/longi_htb_420m?srsId=AfmBOoqyKRx0eFP4duLydKR_-Vn86hrK9GWWe4jW_sETImVCOex6DACn – Назва з екрана.
4. Сонячна панель Jinko Solar 420W(JKM-420N-54HL4-V) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uasun.com.ua/ua/p2071758704-solnechnaya-monokristallicheskaya-panel.html?srsId=AfmBOoq7oF4tumdrI6w5GQyIF9PQl3Wz2eO-lT3v15NdjGrYZBdpVyMJ> – Назва з екрана.
5. Сонячна панель JA Solar JAM54S30-420/LR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-energy.in.ua/Solar_panels/sonyachna-panel-ja-solar-jam54s30-420-lr-420-vt-mono-half-cell-perc.html – Назва з екрана.
6. Сонячна панель Trina Solar VertexS TSM-DE09R.08 420W [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energiya-prirody.prom.ua/ua/p18066083_72-solnechnaya-panel-420.html – Назва з екрана.

Секція 2

Теплоенергетика

УДК 666.3

МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОНОСІЯ ТА РУХУ ЧАСТОК МАТЕРІАЛУ У ВИХРОВОМУ АПАРАТІ

К.т.н., доц. Соколовська І.Є., Лазур В.І., Лазур О.В.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

sokolovskaja7887@gmail.com

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

На сучасному етапі розвитку виробництва теплоізоляційних матеріалів особливу увагу приділяють дослідженню тепломасообмінних і гідродинамічних процесів у вихрових апаратах, що відіграють ключову роль у сушінні та випалі дрібнодисперсних частинок. Геометрія апарату значною мірою впливає на ефективність його роботи, однак відсутність повної теоретичної бази ускладнює проектування, тому побудова математичної моделі залишається актуальною [1].

Оскільки газові потоки в таких апаратах мають складний тривимірний турбулентний характер, традиційні аналітичні підходи є малоефективними. Застосовано чисельне моделювання з використанням методу розщеплення за фізичними чинниками [2], що дозволило на основі газодинамічної моделі [3] побудувати векторні поля швидкостей і проаналізувати просторову картину потоків у циліндричних координатах (рис. 1, 2).

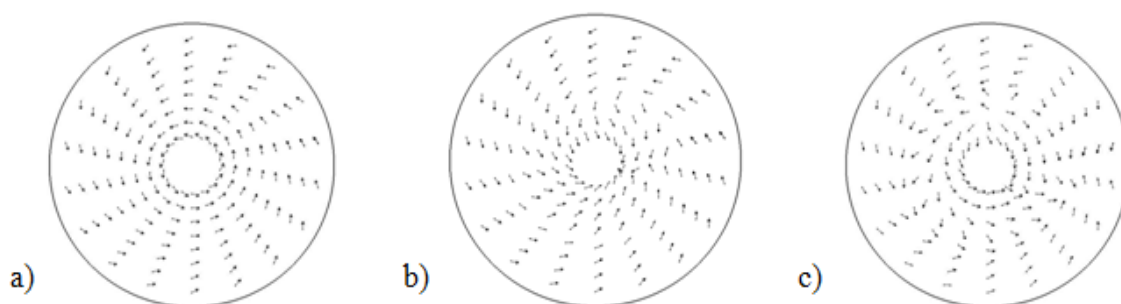


Рисунок 1 – Розраховані поля напрямків швидкостей газу на трьох різних перерізах апарату

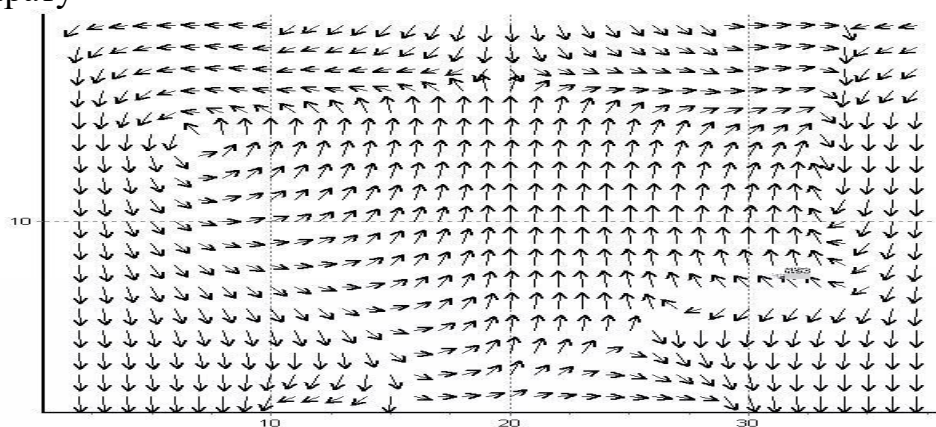


Рисунок 2 – Розподіл напрямків проекцій швидкостей газу в осьовому перерізі апарату

Графічні результати показують, що у верхній частині апарату формується зона зниженого тиску, яка втягує повітря ззовні, тоді як у нижній – відбувається його витік (рис. 2). Таке розподілення обумовлює особливості руху частинок у робочій камері.

Процес сушіння матеріалу відбувається під час витання часток у потоці теплоносія. Ефективність цього процесу залежить від траєкторії руху частки, яка, як встановлено в роботах [2, 3], визначається місцем її введення в апарат і швидкістю потоку. Чисельні розрахунки для швидкостей 5, 10 та 15 м/с показали, що час перебування частки зменшується зі збільшенням відстані точки введення від тангенційного патрубка (рис. 3, а–б). При цьому за нижчих швидкостей частинки швидше залишають апарат, отримуючи менше теплового впливу.

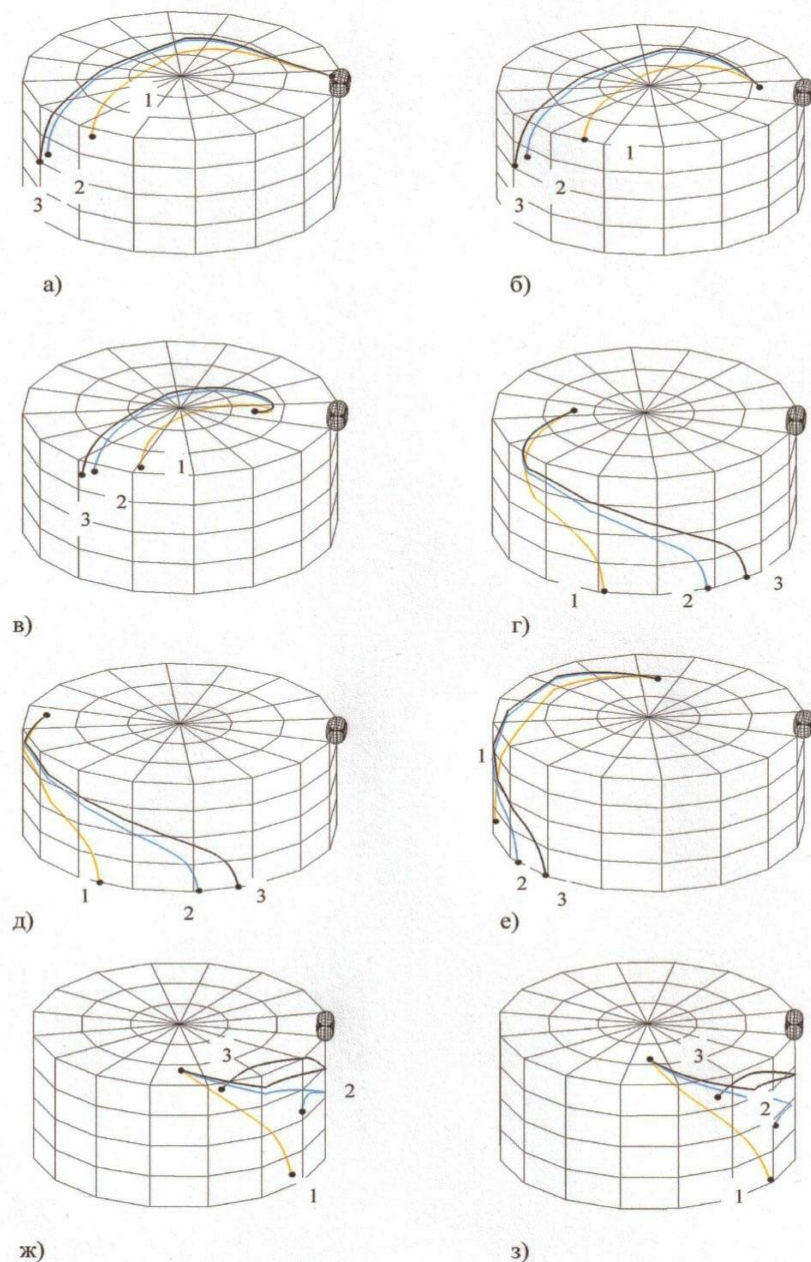


Рисунок 3 – Розрахункові траєкторії руху частки:
1 – швидкість потоку 5 м/с; 2 – 10 м/с; 3 – 15 м/с

З рис. 3, в–з видно, що частинки, введені ближче до центру або бічної стінки, утворюють довші траєкторії, а отже, довше перебувають у камері, що сприяє кращому сушінню. Це важливо для оптимізації конструкції апарату, адже форма та довжина траєкторії часток впливають на габарити пристрою й витрати теплоносія.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення вихрових апаратів із метою зменшення енерговитрат і досягнення потрібної інтенсивності термообробки шляхом регулювання параметрів введення частинок і режимів потоку.

Список літератури:

1. Пристрій для отримання гранульованного наповнювача теплоізоляційного матеріалу: пат. UA 26821 U Україна. МПК F26B 17/10 / А.М. Павленко, І.Є. Соколовська, Г.В. Кошлак, Р.А. Клімов; заявник та власник патенту ДВНЗ «Дніпровський державний технічний університет». – № u 2007 05035; заявл. 07.05.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 16.
2. Соколовська І.Є. Математична модель руху частинок у вихровому апараті / І.Є. Соколовська // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. – Дніпродзержинськ, 2013. – Вип. 2 (20). – С. 120-124.
3. Соколовська І.Є. Математична модель газодинаміки в вихровому апараті / І.Є. Соколовська // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ, 2012. – Вип. 1 (18). – С. 123-128.

УДК 621.1

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Смирнов А.С., 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.

В останні роки теплопостачання міст здійснюється від ТЕЦ та квартальних котелень, спалюючи в них природний газ. Однак, такий спосіб викликає значних перевитрат палива у всій системі. Шляхом вирішення цієї актуальної проблеми сьогодення є використання міні-ТЕЦ, які як правило базуються на газотурбінних або газопоршневих установках [1, 2]. Децентралізація теплопостачання на основі міні-ТЕЦ – це сучасний підхід до енергопостачання, при якому теплота та електроенергія виробляються на безлічі невеликих когенераційних установок, розташованих ближче до споживачів. Цей напрямок особливо актуальний для міст, де зношеність тепломреж та втрати при передачі залишаються проблемою. Основні переваги ГТУ (ГПУ) для енергосистеми полягають в їх мобільності та швидкому запуску. ГТУ замкнутого циклу дозволяють використовувати як тверде, так і рідке паливо, що спалюється в камері згорання, де встановлений підігрівач робочого тіла.

Доцільним є забезпечення від районної ТЕЦ базової частини навантаження, а міні-ТЕЦ працюють тільки в холодний період року, коли потрібен догрів до більш високої температури мережної води [1]. Новим рішенням проблеми раціонального теплопостачання міст є комбінована система теплопостачання в якій відпрацьованою парою турбін ТЕЦ протягом усього року нагрівається вода тільки для потреб гарячого водопостачання, а навантаження опалення покривається від квартальних міні-ТЕЦ, які працюють тільки в опалювальний період.

Була побудована математична модель роботи міні-ТЕЦ. Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільш вигідною з точки зору економії палива є однотрубна схема заміської конденсаційної електростанції і міні-ТЕЦ. Це обумовлюється меншою кількістю теплоносія що перекачується по магістральних мережах, діаметром магістральних мереж, витратою електроенергії на перекачку теплоносія і втрат з витоками і поверхневим охолодженням.

Список літератури:

1. Micro Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems / M. Pehnt [et al]; First Edition. – Springer, 2005.
2. Романовський Г.Ф. Сучасні газотурбінні агрегати. Т.2: Агрегати виробництва країн Західної Європи, Америки та Азії. – Миколаїв: НУК ім. адмірала Макарова, 2005. – 420 с.

УДК 669.162.23

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ПРИ ВИКОРИСТАННІ НАСАДКИ З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ

К.т.н., доц. Кошельнік О.В.^{1, 2}, Жуков О.В.¹, Башлаєв М.А.¹

¹Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, м. Харків

pishti2@ukr.net

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

Традиційні регенеративні теплообмінники доменних печей з суцільною вогнетривкою насадкою мають значні коливання температур димових газів та нагрітого повітря під час робочого циклу. Основна причина коливань температури полягає в тому, що насадка сама по собі є теплоємним елементом, який накопичує тепло від гарячого газу і потім віддає його холодному повітрю (дуттю). Це призводить до зміни її температури протягом робочого циклу, що, в свою чергу, впливає на температуру гарячого дуття [1].

Використання насадки, матеріал якої змінює фазовий стан під час робочого циклу, наприклад, плавлення-затвердіння, може вирішити цю проблему [2]. Матеріали, що змінюють фазовий стан, мають властивість підтримувати постійну температуру під час фазового переходу. Це дозволяє стабілізувати температуру теплоакumuлюючих елементів і зменшити коливання температури газів, що має важливе значення для підтримання заданих умов роботи обладнання [3, 4]. Загальний вид теплоакumuлюючого елемента із плавкою вставкою представлений на рис. 1.



Рисунок 1 – Загальний вид елемента насадки із плавкою вставкою

Стабілізація температури насадки призводить до більш рівномірного розподілу тепла і підвищення ефективності теплообміну. Зменшення нерівномірності температури газів дозволяє покращити контроль над технологічними процесами.

Однак перехід до використання такої насадки вимагає додаткового ретельного аналізу та розрахунків. Для вирішення цих питань широко використовуються методи математичного моделювання.

Підвищення ефективності математичного моделювання пов'язане з розробкою моделей, що враховують комплекс факторів, які впливають на робочі процеси в об'єкті, що розглядається. Відносно регенеративних теплообмінників ефективним виявилось використання чисельних методів із спільним рішенням диференціальних рівнянь переносу в потоках теплоносіїв і теплопровідності насадки [5]. Така система рівнянь містить у собі: рівняння теплопровідності насадки в періоди нагрівання та охолодження; умови теплообміну на зовнішній поверхні насадки; рівняння теплообміну на границі теплоносія та насадки; рівняння руху середовища в періоди нагрівання та охолодження; рівняння періодичності. Також повинні бути задані параметри теплоносіїв на вході в насадку.

Досить зручними для використання є кінцево-різницеві методи, за допомогою яких при великій кількості кроків можна одержати досить високу точність розрахунків, наприклад метод елементарних теплових балансів. Система диференціальних рівнянь, що характеризує процеси складного теплообміну в насадці регенератора, у цьому випадку замінюється системою алгебраїчних рівнянь.

Таким чином, використання методів математичного моделювання дозволить отримати дані для оптимального підбору геометричних характеристик теплоакумуючих елементів насадки та виду матеріалів для них.

Список літератури:

1. Мовчан В.П. Основи металургії / В.П. Мовчан. – Дніпропетровськ: Пороги, 2001. – 334 с.
2. Hauer A. Wärmespeicher / A. Hauer, S. Hiebler, M. Reuß. – Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2013. – 151 p.
3. Кошельнік О.В. Перспективні типи насадок регенеративних теплообмінників скловарних печей / О.В. Кошельнік, С.Б. Гойсан // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2021. – № 1. – С. 3-10.
4. Кошельнік О.В. Аналіз матеріалів теплоакумуючих елементів з фазовим переходом для застосування в регенеративних теплообмінниках доменних печей / О.В. Кошельнік, О.В. Жуков, М.А. Башлаєв // Актуальні проблеми сучасної енергетики : матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (23 травня 2024 р., м. Хмельницький). – Херсон: Книжкове вид-тво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – С. 64-65.
5. Кошельнік О.В. Моделювання роботи теплообмінних апаратів систем енерго- та теплопостачання високотемпературних технологічних установок / О.В. Кошельнік, Є.В. Хавін, В.Г. Павлова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 1. – С.14-18.

УДК 620.9

ВИКОРИСТАННЯ ЕКСЕРГОНОМІЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПОСЛУГ ЖКГ УКРАЇНИ

Каракуца В.П., к.т.н., доц. Долгополов І.С.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

vladkarakuca@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Долгополов І.С.

Вступ. Об'єм використання людством традиційних джерел безперервно зростає. Тому, з точки зору їх вичерпаності і негативної дії на довкілля, актуальним стає підвищення відповідальності кожного жителя планети Земля за ефективне використання цих джерел. В Україні впродовж останніх років показник «питома витрата умовного палива на 1 долар ВВП» в 3 рази перевищує рівень цього показника для передових країн світу і удвічі більше, чим середній по Земній кулі [1].

З літературних джерел відомо, що сектор житлово-комунального господарства (ЖКГ) в Україні споживає 44% всіх енергоресурсів країни, але при цьому енергоємність послуг у 2,5-3 рази перевищує показники європейських країн. При цьому за оцінками фахівців вважається, що потенціал енергозбереження в муніципальному секторі України сягає 40% [1-3].

Постановка задачі. В роботі представлено спробу використати базові термодинамічні, ексергоекономічні та метрологічні аспекти розв'язання задач енергоефективності й енергозбереження із застосуванням їх на прикладах тепло-, газо-, водопостачання у ЖКГ України.

Останнім часом опубліковані роботи, які присвячені використанню ексергетичного методу для оцінки ефективності споживання енергетичних ресурсів, у тому числі в ЖКГ. У роботі [2] розглянуто використання ексергетичного методу для аналізу можливостей підвищення енергетичної ефективності у виробництві теплової енергії. Оптимізацію температурного графіку централізованого теплопостачання за критерієм «мінімуму витрат ексергії» представлено в роботі [3].

Подальшим розвитком цього напрямку є застосування ексергоекономічних показників роботи систем централізованого теплопостачання, газопостачання та водопостачання з метою визначення справедливої оплати цих послуг.

Результати роботи. В системі оплати послуг тепло-, газо- і водопостачання в комунальному господарстві України основою є кількість теплової енергії, витрати газу та води, отримуваних від джерела енергії за певний проміжок часу. Цей підхід реалізується у вигляді аналітичних залежностей, закладених у приладах обліку відпущеної виробником і отриманої споживачем енергії. Використовуються наступні одиниці виміру кількості енергії, споживаної потужності, кількості або витрати енергоносія у часі: Дж, кВт·год, кВт; м³, м³/год; кг, кг/год.

Ця різноманітність одиниць виміру показує відсутність енергетичної

єдності у підході до вимірювання отриманої та спожитої енергії.

Ексергоекономічні та метрологічні аспекти в системі обліку теплопостачання житлових будинків

В даний час облік споживаної теплової енергії регламентується Постановами Кабінету Міністрів України [4]. Відповідно до методики, викладеної у цих документах, витрата споживаної теплової енергії в системах теплопостачання визначається за рівняннями теплопередачі з урахуванням емпіричних поправкових коефіцієнтів, що враховують середні температури довкілля за період та ін.

Для формування ціни використовуються одиниці виміру – кДж, кВт·год (кВт). При цьому враховується тільки кількість (рівняння (1)) та витрата (рівняння (2)) спожитої енергії на опалювання будинків.

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2) = c_p \cdot m \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$\dot{Q} = c \cdot \dot{m} \cdot (t_1 - t_2) = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де Q і $\dot{Q}$ – відповідно кількість енергії, кВт·год, і витрата енергії, кВт, отриманої системою опалювання будинку; c_p – питома теплоємність води, кДж/(кг·К); m і $\dot{m}$ – маса і масова витрата води, що проходить через трубопроводи системи опалювання, кг (кг/с); t_1 – температура теплоносія на вході в об'єкт, °С; t_2 – температура теплоносія на виході з об'єкту, °С; Δt – різниця температур теплоносіїв, °С.

Залежність (2) покладена в основу роботи лічильників теплової енергії «Січ», «QALCO (SKS-3)» та інших, що використовуються в Україні.

Проте залежності (1) і (2) чутливі тільки до різниці температур, незважаючи на абсолютні значення температур, тобто ці залежності не враховують якість енергії на опалення. Якість теплової енергії оцінюється її максимальною працездатністю – ексергією – в умовах навколишнього довкілля.

У результаті застосування ексергетичного підходу рекомендується наступна методика формування аналітичних залежностей для обліку та оплати отриманої і використаної теплоти. Визначаються величини питомої ексергії на вході $e1$ і виході $e2$ об'єкту у кДж/кг:

$$e1 = Q(1 - T_{o.c} / T1) = c_p m1 (t1 - t2) (1 - T_{o.c} / T1), \quad (3)$$

$$e2 = Q(1 - T_{o.c} / T2) = c_p m2 (t1 - t2) (1 - T_{o.c} / T2), \quad (4)$$

де $T_{o.c}$ – температура оточуючого середовища, К; $T1$ – температура теплоносія на вході в об'єкт, К; $T2$ – температура теплоносія на виході з об'єкту, К.

В рівняннях (1) та (2) представлено теплову енергію різної якості, яка визначається величинами роботоздатності енергії, обумовленої температурами теплоносіїв. Залежність для розрахунку суми оплати за використану теплову енергію Sek за період часу τ має вигляд:

$$Sek = [c_p m (t1 - t2) (1 - T_{o.c} / T1) \cdot Ce1 - c_p m (t1 - t2) (1 - T_{o.c} / T2) \cdot Ce2] \cdot \tau, \quad (5)$$

де $Ce1$ і $Ce2$ – ціни теплової енергії на основі ексергетичного підходу температур $T1$ та $T2$, грн/(кВт·год); τ – проміжок часу спостережень, год.

Дослідження щодо формування тарифів на теплову і електричну енергію, яка відпускається споживачеві з ТЕЦ, з використанням ексергетичного методу

розглядаються у роботі [5].

В існуючих будівлях використовуються два види розводки: однотрубна і двотрубна. Найважливішими перевагами двотрубною системи є: 1) можливість установки квартирних приладів обліку споживаної теплоти та 2) можливість регулювання системи з урахуванням роботи усіх радіаторів системи опалювання. У представлених в роботі рішеннях використання двотрубною системи опалення будинку забезпечує максимально можливий результат з енергоефективності і енергозбереження в системі опалювання.

Система обліку, що пропонується, має наступні переваги: 1) сума оплати враховує не тільки кількість, а й якість теплоти, що подається; 2) враховується ефективність роботи усіх елементів цієї системи; 3) виробники, постачальники і споживачі теплової енергії мобілізуються на ефективне використання енергії та енергозбереження.

Ексергоекономічні і метрологічні аспекти в системі обліку газопостачання житлових будинків

В даний час облік витрата природного газу визначається за допомогою приладів, які враховують об'єм середовища, що проходить через лічильник за певний період часу. Діючи зараз система тарифів на природний газу не враховує поточний склад газу та працездатність енергії газу.

Працездатність природного газу визначається його ексергією E , і розраховується за залежністю:

$$E = K \cdot Q_p^B \quad (6)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від виду газу; Q_p^B – вища теплота спалювання природного газу, МДж/м³.

Для природного газу величина K складає за даними літературних джерел від 0,95 до 1,04 [6].

Аналіз даних паспортів фізико-хімічних параметрів природного газу хіміко-аналітичних лабораторій постачальників газу, свідчить про коливання газу протягом термінів спостереження.

Зважаючи на те, що зараз споживачам поставляють природний газ з коливанням хімічного складу у часі, в розрахунках зі споживачами треба звернути увагу на доцільність врахування ексергії E_{ng} природного газу в наступному вигляді:

$$S_{ng} = V_{ng} \cdot E_{ng} / E_{ngn} \cdot C_{ng} \cdot \tau_1, \quad (7)$$

де S_{ng} – сума оплати за природний газ, що постачається споживачеві за період часу, грн. /(год, доба, місяць); V_{ng} – об'єм газу, що постачається за період часу, м³/(год, доба, місяць); E_{ng} – мінімальна ексергія природного газу, що постачається, передбачена ДСТУ, МДж/м³; E_{ngn} – ексергія природного газу за даними паспортів фізико-хімічного складу природного газу, МДж/м³; C_{ng} – ціна одиниці об'єму природного газу за мінімальною ексергією, що передбачена ДСТУ, грн/м³; τ_1 – термін розрахунку, (год, доба, місяць).

Ексергоекономічні і метрологічні аспекти в системі обліку водопостачання житлових будинків

Споживачі систем центрального водопостачання розраховуються з

організаціями, що постачають воду, за об'єм отриманої води протягом місяця.

Об'єм постачаємої води визначається за показаннями лічильників витрати води. Проте, при формуванні ціни на воду не враховується те, що в залежності від місця підключення споживача до колекторів, вони отримують воду неоднакових тисків і витрат в одиницю часу, не зважаючи на однаковий тариф. У зв'язку з цим у залежність для визначення суми оплати за воду необхідно ввести складову, що враховує працездатність потоку води. Ця величина повинна враховувати витрати енергії на 1 м³ води при номінальному P_n і реальному тиску P у системі водопостачання.

Залежність для розрахунку за поставлену воду в цьому підході має вигляд:

$$S_B = P / P_n \cdot V \cdot C_{\text{пит}} \cdot \tau_v, \quad (8),$$

де P – тиск потоку води у споживача, МПа; V – об'ємна витрата води, м³/с; P_n – номінальний тиск води, МПа; $C_{\text{пит}}$ – ціна 1м³ питної води, що постачається, при номінальному тиску води P_n , грн/м³; τ_v – проміжок часу, протягом якого здійснювалося водопостачання, (доба, місяць).

Висновки. Реалізація ексергоекономічного підходу до тарифів на послуги тепло-, газо- та водопостачання дозволяє: а) з єдиних ексергетичних позицій оцінювати ефективність функціонування усіх елементів систем тепло-, газо- і водопостачання; б) практично здійснити ринковий підхід до формування тарифів на тепло-, газо- і водопостачання, тобто мобілізувати виробників, постачальників і на енергозбереження і на енергоефективність.

Слід очікувати, що впровадження цих принципів має соціальний вплив, бо це крок, який єднає громадян України у розв'язанні задач встановлення прозорості та справедливої цінової політики держави у ЖКГ і поліпшення екологічної ситуації в нашій країні.

Список літератури:

1. Зеркалов Д.В. Енергозбереження в Україні: монографія [Електронний ресурс] / Д.В. Зеркалов; Нац. техн. ун-т України «КПІ». – К.: Основа, 2012.
2. Степаненко І.І. Проблеми та перспективи розвитку енергоефективності в житловому секторі міст України [Електронний ресурс] / І.І. Степаненко // Ефективна економіка. – 2010. – №11. – . <http://www.economy.nayka.com.ua/>. – Назва з екрана.
3. Енергоефективність в муніципальному секторі. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування / А. Максимов [та ін.]. – Київ, 2015. – 184 с.
4. Беленкова О.Ю. Економічна оцінка заходів з підвищення енергоефективності / О.Ю. Беленкова, І.О. Остапенко // Будівельне виробництво. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – 55. – С. 28-31.
5. Даукеев Г.Ж. О формировании тарифа на тепловую энергию ТЭЦ на основе эксергетического метода [Електронний ресурс] / Г.Ж. Даукеев, В.Д. Огай // Алмаатинский институт энергетики и связи. – Режим доступу: <https://www.aipet.kz>. – Назва з екрана.
6. Shargut Y.A. Eksergiya / Y.A. Shargut, R. Petela; perevod s pol'skogo podred. V.M. Brodyanskogo. – М.: Energiya, 1968. – 279 р.

УДК 621.577

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ

Соляник М.Ю., Яровий О.С., Комар В.П.

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*
g.lavamay@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Кобалава Г.О.

Розширення глобального промислового виробництва та зростання споживання енергії призвело до неконтрольованого використання невідновлюваних енергоресурсів. Водночас визнається, що не всі джерела енергії є нескінченими: запаси цінних ресурсів зменшуються, ціни на газ зростають, а екологічна деградація посилюється [1]. Україна активно досліджує стратегії підвищення енергоефективності [2].

При аналізі динаміки зростання вартості енергоресурсів важливо зазначити, що темпи зростання вартості електроенергії значно нижчі порівняно з природним газом та нафтою. Більше того, враховуючи, що електроенергія постачається споживачам у нічний час за значно нижчим тарифом, це створює сприятливе середовище для використання електричної енергії з метою забезпечення якісного теплопостачання житлових приміщень [3]. Комбінуючи електроопалення з традиційним теплотехнічним обладнанням та тепловими насосами, можна забезпечити ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів у муніципальному (житлово-комунальному) енергетичному секторі [4].

Параметри зовнішнього повітря, включаючи температуру, були отримані з електронного ресурсу "meteomanz.com". Визначено дані за опалювальні періоди трьох років – з 2021 по 2023 роки – з інтервалом у 3 години. Метеорологічні параметри, зокрема температура повітря, вологість, тиск і вітер, були зібрані та представлені у табличній формі.

Об'єктом дослідження є великий одноповерховий будинок за межами садиби, в якому реалізовано архітектурні рішення для захоплення й акумулювання великої кількості тепла з навколишнього середовища. У будинку встановлено теплі підлоги, утеплення та різні теплоносії для підтримання комфортного мікроклімату, загальна площа будівлі сягає 200 кв. м.

Для аналізу ефективності використання електричного опалення були запропоновані кілька схем опалювальних систем. За базову була взята існуюча схема з газовим котлом типу Vitodens 100-W з тепловою потужністю 26 кВт і двоступінчастим регулюванням потужності (30% і 100%) у погодозалежному режимі. Для системи електричного опалення пропонується використовувати двоконтурний електричний котел VITOTRON 100 з тепловою потужністю 30 кВт, який може працювати в погодозалежному режимі з плавним регулюванням електричної потужності від 10% до 100%.

При розгляді використання електрокотла та комбінованого використання котла з тепловим насосом (рис. 1) було визначено, що навантаження на електрокотел становить $N_{eb} = 5 \div 23$ кВт.

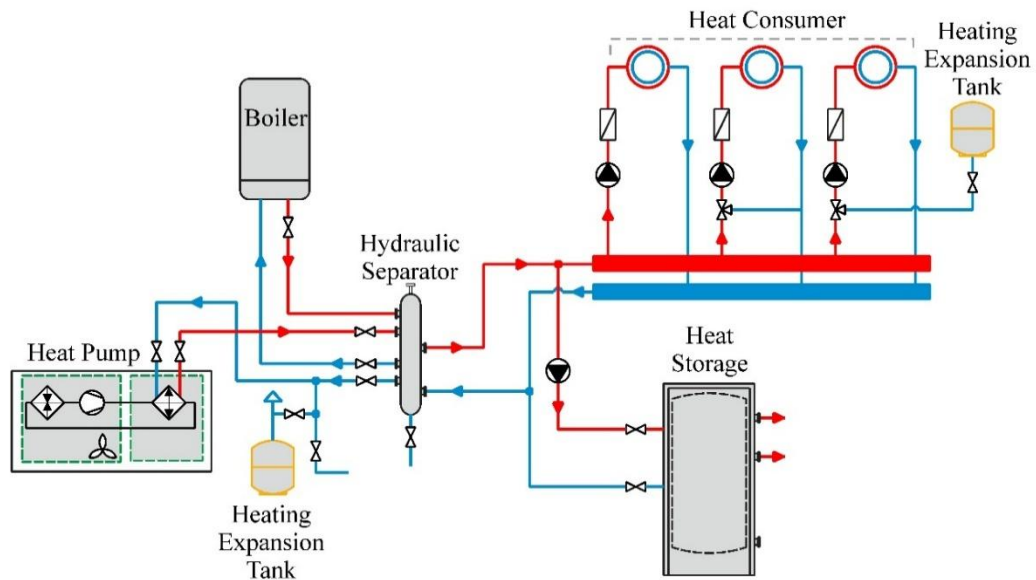


Рисунок 1 – Система опалення, яка включає комбіновану роботу теплового насоса та котла

Загальне споживання електричної енергії для системи опалення з електрокотлом становить $\Sigma N_{eb} = 35\,000$ кВт·год, навантаження на тепловий насос для комбінованої схеми – $\Sigma N_{hp} = 14\,500$ кВт·год, а навантаження на електрокотел у комбінованій схемі – $\Sigma N_{eb, hp} = 300$ кВт·год. У такому випадку загальне споживання електроенергії для комбінованої схеми становитиме $\Sigma N_{eb, hp+hp} = 14\,800$ кВт·год. Впровадження теплового насосу дозволяє суттєво скоротити витрати на паливо та підвищити загальну ефективність системи опалення. Розроблена методика рекомендована для кліматичних умов півдня України, де близько половини зимового періоду температура перевищує 4°C .

Список літератури:

1. Mahmood N. Renewable energy, economic growth, human capital, and CO₂ emission: an empirical analysis/ N. Mahmood, Z. Wang, S.T. Hassan //Environ Sci Pollut Res Int. – 2019. – 26(20). – P. 20619-20630.
2. Yu Z. Investigation of thermopressor with incomplete evaporation for gas turbine intercooling systems/ Z. Yu, T. Løvås, D. Konovalov, E. Trushliakov, M. Radchenko, H. Kobalava, R. Radchenko, A. Radchenko// Energies. – 2023. – 16(1). – 20.
3. Miranda Barbosa E. EU coal regions – Opportunities and challenges ahead / E. Miranda Barbosa et al. – Publications Office of European Union. – 2018.
4. Konovalov D. Energy Efficiency of Combined Heating Systems Based on Heat Pumps for Private Residential Buildings Under the Climatic Conditions of Ukraine / D. Konovalov, H. Kobalava, M. Radchenko, M. Karpoff, Y. Shapovalov // LNME Advanced Manufacturing Processes V. – 2023. – P. 531-540.

УДК 621.311.22:504.06

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ТОПКОВИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ ТЕПЛООБМІНУ

Усов І.Л., к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Національний технічний Університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ

usov.ivan99@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Сучасна енергетика України значною мірою залежить від теплоелектростанцій, більшість з яких працюють на вугіллі та характеризуються високим рівнем фізичного і морального зносу. Попри важливу роль ТЕС у забезпеченні базового навантаження енергосистеми, їх експлуатація супроводжується підвищеним рівнем викидів шкідливих речовин – діоксиду сірки, оксидів азоту, твердих частинок та CO_2 , які формують значний техногенний тиск на навколишнє середовище, спричиняють кислотні дощі, смог, забруднення ґрунтів та водних ресурсів [1, 3]. З огляду на міжнародні зобов'язання України щодо скорочення викидів парникових газів та адаптації до європейських стандартів у сфері охорони довкілля, модернізація ТЕС набуває особливої актуальності. Водночас повна заміна обладнання є фінансово затратною, що обумовлює потребу у пошуку ефективних, адаптивних і відносно малозатратних рішень для екологічної модернізації теплової генерації, зокрема шляхом удосконалення топкових процесів і систем теплообміну.

Метою даного дослідження є обґрунтування доцільності впровадження технологічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності й екологічної безпеки теплоенергетичних установок шляхом удосконалення топкових процесів, теплообміну та зменшення викидів забруднюючих речовин.

Основні екологічні проблеми ТЕС. Під час спалювання органічного палива в котлоагрегатах формуються значні обсяги шкідливих викидів:

- SO_2 – у результаті згоряння сірковмісних домішок;
- NO_x – через високі температури згорання та наявність кисню;
- CO – при нестачі повітря чи нерівномірному змішуванні;
- зола та пил – при використанні твердого палива.

Високий рівень викидів пов'язаний із низьким ККД топкових процесів, застарілою конструкцією пальників, недостатнім контролем параметрів горіння та тепловтратами через димові гази [1, 2].

Шляхи підвищення екологічної ефективності:

1. Технологічні вдосконалення топки:

- встановлення пальників з низькотемпературним горінням для зменшення утворення NO_x [4];

- впровадження ступеневого підведення повітря;
- застосування добавок-каталізаторів до палива або повітряної суміші;
- контроль співвідношення «паливо–повітря» з автоматизованим регулюванням.

2. Теплообмін і утилізація теплоти:

- використання конденсаційних теплообмінників для рекуперації теплоти з димових газів [5];
- впровадження контактних теплообмінників типу «Акваріус» або CHNG, що забезпечують зниження температури викидів та «генерацію» технічної води[3];
- зниження температури димових газів до точки роси (35–40 °C) з одночасною конденсацією пари [3, 8].

3. Альтернативні рішення:

- впровадження когенераційних установок малої потужності (газопоршневі або паротурбінні) [6];
- заміна або доповнення котлів біомасовими або комбінованими палинками;
- застосування теплонасосних систем на підприємствах із зворотними тепловими потоками [7].

Впровадження контактних теплообмінних пристроїв дозволяє підвищити ефективність до 10–12% та значно зменшити концентрації NO_x і CO [2, 3]. Завдяки принципу прямого енергетичного обміну між газовим потоком і рідиною, такі установки забезпечують конденсацію водяної пари та додаткове охолодження димових газів, що також сприяє зниженню теплових втрат і викидів.

Модернізація палиникових пристроїв, зокрема впровадження систем із багатоступеневим підведенням повітря та використанням низькотемпературного горіння, дозволяє зменшити викиди оксидів азоту до 30–60% залежно від типу палива й умов експлуатації. Такі заходи не тільки знижують рівень шкідливих викидів, а й покращують контроль горіння, що позитивно впливає на стабільність роботи котлоагрегатів.

Водночас, впровадження подібних технічних рішень зазвичай не вимагає значних просторових змін або повної реконструкції існуючих систем, що робить їх особливо привабливими в умовах обмеженого фінансування, характерного для більшості енергогенеруючих підприємств України. Більше того, такі рішення можуть бути впроваджені поетапно, з адаптацією під специфіку кожного об'єкта.

Висновки. Основним джерелом екологічного забруднення від ТЕС є застарілі топкові процеси. Підвищення екологічної ефективності можливе через локальні модернізації: палинки, теплообмінники, управління горінням. Перспективними є технології контактного теплообміну, когенерація, низькотемпературне згорання. Вибір конкретного підходу має враховувати стан обладнання, паливну базу, локальні екологічні умови та економічну доцільність.

Список літератури:

1. Варламов Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії: Підручник / Г.Б. Варламов, Г.М. Любчик, В.А. Малярєнко. – К.: ІВЦ «Видвництво «Політехніка», 2003. – 232 с.
2. Степанов Д.В. Енергомодернізація промислової котельні / Д.В. Степанов, Н.Д. Степанова, С.О. Білик // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2020. – № 2. – С. 108-112.
3. Varlamov G.B. Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes / G.B. Varlamov, K.A. Romanova, I. Nazarova, O. Daschenko, A. Kapustiansky // Archives of thermodynamics. – 2017. – Vol. 38, No. 4. – P. 127-137.
4. Kristinsson H., Lang S. Boiler Control – Improving Efficiency of Boiler Systems: Master's thesis. – Lund: Lund University, Faculty of Engineering, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation, 2010. – 73 p.
5. Campbell R.J. Increasing the Efficiency of Existing Coal-Fired Power Plants: Congressional Research Service Report R43343. – Washington, D.C.: Congressional Research Service, 2013. – 28 p.
6. Drożdż W. Aspects of developing an innovative, energy-efficient, low-emission co-generator / W. Drożdż, M. Konopacki, P. Michalak, P. Nowak // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 9. – 2097.
7. Ismayilzada M. Study of technical means for heat generation, its application, flow control, and conversion of other types of energy into thermal energy / M. Ismayilzada, S. Abbasova, U. Novruzova, T. Safarova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1070, No. 1. – 012081.
8. Eze V.H.U. Advancements in energy efficiency technologies for thermal systems: A comprehensive review / V.H.U. Eze, J.S. Tamball, O.F. Uzoma, N.I. Sarah, O. Robert, O.O. Wisdom // INOSR Applied Sciences. – 2024. – Vol. 12, No. 1. – P. 1–20.

УДК 66.045.129.2

ВПЛИВ РОЗВИНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ПІДІГРІВАЧІВ

Коровін О.О., 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.

Однією з основних характеристик теплообмінних апаратів є об'єм займаний ними. Найчастіше виникають обмеження по займаному об'єму апарату, або по різним геометричним його розмірам, що викликане компонуванням обладнання, або споживчих об'єктів. Найбільшого використання для підігріву або охолодження середовища знаходять кожухотрубні теплообмінники [1]. Такий тип теплообмінників дозволяє використовувати розвинені поверхні теплообміну, а саме оребрені трубки.

Метою роботи є визначення впливу коефіцієнту оребрення, несучого діаметру оребрення трубки та довжини однієї оребреної трубки, як основних факторів на геометричний об'єм теплообмінника.

Для раціональної постановки експерименту по визначенню впливу факторів на таку характеристику теплообмінника як його об'єм обрано центральний композиційний план другого порядку $k = 3$ [2]. Проводячи дослідження впливу прийнятих параметрів на загальний об'єм апарату була отримана математична модель досліджуваного процесу:

$$\hat{y}_1 = 7,32 + 1,85x_1 + 2,553x_2 + 2,222x_3 + 0,432x_1x_2 + 0,358x_1x_3 + 0,564x_2x_3 + 0,198x_2^2 + 0,307x_3^2, \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (1)$$

Аналізуючи рівняння (1) видно, що найбільший вплив на загальний об'єм теплообмінника має фактор x_2 (несучий діаметр труби). Вплив коефіцієнту оребрення x_3 має вторинне значення на об'єм теплообмінника так само як і на загальну довжину його трубок. В той же час такий фактор як довжина однієї трубки має найменший вплив на шукану функцію x_1 .

Розроблена методика дозволяє проаналізувати вплив основних параметрів на знаходження мінімальної величини геометричного об'єму теплообмінника при заздалегідь заданому значенні одного з параметрів. Досягнути зменшення загального об'єму апарату можна зменшенням довжини однієї трубки поперек потоку теплоносія, коефіцієнту оребрення та несучого діаметру трубки.

Список літератури:

1. Клімов Р.О. Розвинені поверхні як фактор оптимізації конструкції теплообмінників / Р.О. Клімов, Д.О. Анісімов // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2023. – 1(42). – С.140-146.
2. Нечаєв В.П. Теорія планування експерименту. Навчальний посібник / В.П. Нечаєв, Т.М. Берідзе, В.В. Кононенко. – К.: Кондор, 2005. – 232 с.

УДК 536.24:662.997:004.942

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ В ПАРОПЕРЕГРІВНИКАХ КОТЛОАГРЕГАТИВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Ас. Беднарська І.С., Оліферук Т.С.

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

innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Вступ. Ефективність роботи котлоагрегатів у теплоенергетиці значною мірою залежить від конструкції та технічного стану пароперегрівників, які забезпечують необхідні параметри пари. Невідповідний розподіл температури, нераціональні гідродинамічні умови та зношені конструктивні елементи можуть знижувати коефіцієнт теплопередачі, викликати локальні перегріви та зменшувати загальну економічність енергетичного об'єкта [1]. У зв'язку з цим актуальною є задача оптимізації конструкції пароперегрівників із застосуванням сучасних методів математичного моделювання. **Мета дослідження** – проаналізувати вплив геометричних змін трубчастої поверхні пароперегрівника на характеристики теплообміну та визначити можливі шляхи підвищення ефективності теплообміну на основі чисельного моделювання.

Методика дослідження. Для аналізу процесів тепло- та масообміну в пароперегрівнику було застосовано метод скінченних об'ємів (Finite Volume Method, FVM), який є одним із найпоширеніших підходів у чисельному моделюванні задач теплообміну й гідродинаміки. Цей метод забезпечує розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса в інтегральній формі, що дозволяє точно врахувати розподіл температури, тиску та швидкості у складних геометричних об'ємах, зокрема в зоні пароперегрівника з нерівномірною будовою [2].

Для достовірного відтворення турбулентної структури потоку та адекватної оцінки теплових втрат застосовано модель турбулентності SST $k-\omega$ (Shear Stress Transport $k-\omega$ model). Ця модель дозволяє точно змоделювати поведінку прикордонного шару поблизу стінок, що критично важливо для елементів із ребренням, де теплові градієнти особливо великі. SST $k-\omega$ поєднує переваги моделі $k-\epsilon$ у дальньому полі та $k-\omega$ у приповерхневих зонах, що забезпечує високу точність моделювання як для основного потоку, так і для зони турбулентного відриву [2].

Результати чисельного моделювання дозволяють отримати карти розподілу температури, поля швидкості й турбулентної енергії, що є основою для оптимізації геометрії пароперегрівника, підбору раціонального кроку труб, висоти ребер і режимів роботи теплоносія. Отримані дані можуть бути використані для підвищення ефективності теплообміну, зменшення теплових втрат і зниження гідравлічного опору системи [3]. У моделі враховано теплові втрати в навколишнє середовище, температурні деформації матеріалу труб та

зміни властивостей пари залежно від температури. Як вхідні параметри моделі використано типові значення для пароперегрівників котлів П-50.

Проведено серію симуляцій з варіацією наступних параметрів:

- 1) висота та крок оребрення труб;
- 2) щільність розміщення труб;
- 3) конфігурація оребреної поверхні (поздовжні або спіральні ребра);
- 4) кут потоку теплоносія до осі труб.

Результати та обговорення. Результати моделювання показали, що застосування оптимального кроку оребрення та щільності розміщення труб забезпечує рівномірніший розподіл температури по довжині труб та знижує максимальні теплові напруги на 12–15 %. Зокрема, оребрення висотою 12 мм із поздовжнім розташуванням забезпечило найвищий коефіцієнт теплопередачі серед розглянутих варіантів.

Варіації кута потоку теплоносія мали вплив на формування вихрових зон, що суттєво впливає на турбулентність і, відповідно, на інтенсивність теплообміну. При куті потоку 30° зафіксовано підвищення коефіцієнта теплопередачі на 8 % порівняно з традиційним перпендикулярним обтіканням труб.

Також встановлено, що зменшення міжосьової відстані між трубами сприяє зростанню щільності теплового потоку, але може призвести до небажаного підвищення локального опору потоку, що зменшує загальну економічність. Тому рекомендовано використовувати компромісний варіант щільності компоновки, який оптимізує як теплообмін, так і гідравлічні втрати.

Висновки. Застосування чисельного моделювання дозволяє виявити критичні ділянки з неефективним теплообміном у конструкції пароперегрівника без потреби у дорогих експериментах. Оптимізація параметрів оребрення та геометрії трубчастих елементів здатна підвищити коефіцієнт теплопередачі до 10–12 % та знизити витрати палива. Розроблені рекомендації можуть бути використані при модернізації котлів ТЕС або при проектуванні нових теплоенергетичних установок. Перспективним напрямом подальших досліджень є врахування динамічного навантаження при змінних режимах роботи котлоагрегату та поєднання CFD-аналізу з оцінкою напружено-деформованого стану труб.

Список літератури:

1. Ткаченко О.О. Високотемпературні процеси та установки / О.О. Ткаченко. – Київ: А.С.К., 2005. – 520 с.
2. Іродов В.Ф. Теплогенеруючі установки та їх математичне моделювання: навчальний посібник / В.Ф. Іродов, В.В. Ткачова, Г.Я. Чорноморець. – Дніпропетровськ: Будинок друку, 2015. – 80 с.: ілюстр. ISBN 978-966-323-139-6.
3. Системний аналіз у теплопостачанні з трубчастими газовими нагрівачами: навчальний посібник / Р.В. Барсук [та ін.]. – Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА», 2017. – 92 с.: ілюстр. ISBN 978-966-323-166-2.

УДК 66.045.129.2

ВПЛИВ ОРЕБРЕННЯ ТРУБЧАСТОЇ СИСТЕМИ НА КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТЕПЛООБМІННИКА

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.

Оптимізація геометричних параметрів теплообмінних апаратів може проводитись за багатьма параметрами. Одними з найважливіших є геометричні розміри [1, 2]. Розробка оптимізованої конструкції теплообмінника за допомогою методів планування експерименту є актуальною задачею. Це дозволяє мінімізувати витрати матеріалів на виготовлення апаратів та найбільш ефективно передавати теплоту.

Метою роботи є визначення впливу таких факторів як довжина однієї оребреної трубки, несучий діаметр оребрення трубки та коефіцієнт оребрення на оптимальне конструктивне виконання підігрівача стисненого повітря за показником мінімальної довжини трубної системи.

З метою раціональної постановки експерименту з вивчення процесу побудування оптимальної конструкції теплообмінного апарату за критерієм мінімальної довжини трубчастої системи обрано центральний композиційний план другого порядку $k = 3$. Математична модель досліджуваного процесу

$$\hat{y}_1 = 5,812 + 1,344x_1 + 0,245x_2 - 0,634x_3 - 0,275x_1x_3 - 0,203x_1^2 + 0,166x_3^2. \quad (1)$$

Аналізуючи отримане рівняння видно, що найбільший вплив на загальну довжину труб теплообмінника має фактор x_1 , тобто довжина однієї трубки поперек потоку повітря. Вторинне значення на загальну довжину трубок має коефіцієнт оребрення x_3 , а знак вказує на те, що зі збільшенням коефіцієнту оребрення загальна довжина буде зменшуватися. Останнє місце за впливом на значення шуканої функції є несучий діаметр оребрення x_2 .

За допомогою розробленої методики можна в достатньо простій постановці проаналізувати значення довжини трубчастої системи теплообмінника при різних поєднаннях наведених факторів та оптимізувати його конструкцію.

Список літератури:

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств. Навчальний посібник / Р.О. Клімов. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – 200 с.
2. Клімов Р.О. Оптимізація конструктивного виконання теплообмінних апаратів / Р.О. Клімов // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2020. – 1(36). – С.88–93.

УДК 621.7

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ЗАХИСТ ВІД НАКИПУ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

Величко Д.А., Величко О.А.

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

n.p.kundenko@ukr.net

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кунденко М.П.

Існує кілька фізичних методів, які знижують швидкість утворення накипу. Ультразвукова технологія відрізняється в цій серії тим, що вона впливає на формування та врегулювання масштабів кількома різними способами одночасно [1].

По-перше, коли вода знаходиться під впливом ультразвуку достатньої інтенсивності, то відбуваються руйнування, розщеплення солей жорсткості, що утворюються у нагрітій воді. Коли тверде тіло контактує з рідиною, накип утворюється на твердому тілі. Це може бути або теплообмінна поверхня, або частинки, суспендовані у воді, що є центрами кристалізації солей, розчинених у воді.

У звичайних умовах загальна площа поверхні воді, менша, ніж площа теплообмінної поверхні обладнання, і на ній утворюється накип. Але під впливом ультразвуку кристали карбонату кальцію, які знаходяться у воді, розщеплюються, їх середній розмір зменшується з 10 до 1 мкм, їх кількість та загальна площа поверхні збільшуються.

Під впливом ультразвуку у воді кількість центрів кристалізації різко збільшується (приблизно в 1000 разів). Це призводить до перенесення процесу утворення накипу від теплообмінної поверхні до рідини, до водної колони, до кристалізації солей безпосередньо у водній масі, що пов'язано з появою великої кількості кристалів під дією ультразвуку, до постійної явища, росту та розщеплення кристалів солей.

По-друге, ультразвук збуджує високочастотні коливання в металевій поверхні теплообміну. Поширення на поверхню, ультразвукові вібрації запобігають утворенню масштабних відкладень на ній, уповільнюючи осадження утворених кристалів солей.

Тому однією з основних вимог до успішного використання ультразвукової технології є попереднє очищення, наскільки це можливо, від старого шару накипу механічними засобами. У найсуворіших випадках з водою з карбонатною жорсткістю понад 10 м-екв/літр термін служби нагрівача між очищенням або заміною пучка трубки збільшується щонайменше в три рази. З жорсткістю води менше 8 м-екв/літр термін між очищенням збільшується у 4÷5 разів [2].

Ультразвукове видалення накипу – це процес поширення механічних коливань у середовищі з високою частотою ультразвуку. УЗД обладнання в

основному складається з ультразвукових генераторів, систем передачі звуку та перетворювачів у трубах теплообмінника. Ультразвуковий захист від накипу в основному використовує звукове поле ультразвукової потужності для обробки рідини, так що фізико-хімічні показники та форми речовин у рідині змінюватимуться під впливом ультразвукових хвиль. Таким чином, досягається ефект захисту теплообмінника від утворення накипу та видалення шлаку, а ефективність теплопередачі покращується.

Порівняно з традиційним методом [3] основна перевага ультразвукового методу видалення накипу полягає в тому, що він не потребує використання жодних хімічних речовин, тобто не вимагає додавання жодних речовин до води. Принцип ультразвукового методу видалення накипу полягає у використанні ультразвукових коливань для вібрації металевої структури зварного теплообмінника та води.

Під впливом цих вібрацій сіль у воді починає кристалізуватися і не буде контактувати з металевою структурою, вібруючи з однаковою частотою ультразвуку. Вібрація стінки труби запобігає відкладенню на внутрішній стінці труби солі.

Під впливом бічної вібрації, створеної трубою, почне вібрувати шар накипу, який був осаджений на трубі. В результаті вібраційних коливань появляються мікротріщини в прошарку накипу. Під впливом ультразвукових коливань вода проникає в прошарок накипу, оскільки опір руху рідини значно зменшується в капілярі.

Коли вода потрапляє в контакт зі стінкою гарячої труби, вона розширюється і навіть кипить, утворюючи бульбашки, які здійснюють тиск на краї тріщини, що призводить до руйнування накипу на стінках труби. Але під час тривалої експлуатації на очищеній поверхні знову утворюється новий шар накипу. Коли шар накипу досягає вищезгаданої товщини, ультразвукова хвиля знову змушує механічною вібрацією досягти певного динамічного балансу.

Більше того, ефективність теплообміну стінки труби не зменшується. Так як фрагменти накипу, рухаючись в потоці води, отримують теплову енергію від стінки труби і передають теплову енергію воді.

Роль ультразвукових хвиль полягає не лише у запобіганні утворення накипу та підтримці вихідних параметрів пристроїв, але і в покращенні вихідних параметрів теплоносіїв.

Список літератури:

1. Назарчук З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Науково-технічний посібник: у 3 т. / З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський. – К: Наук. думка, 2009. – Т.1: Теоретичні основи методу акустичної емісії. – 287 с.
2. Патент 100470 Україна, МПК C02F1/36, C02F1/30. Ультразвуковий пристрій для обробки рідини /О.Ф. Луговський, А.В. Мовчанюк, О.О. Луговський; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.
3. Степанова Н.Д. Теплові мережі. Навчальний посібник / Н.Д. Степанова, Д.В. Степанов. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 135 с.

УДК 621.311

ВИМОГИ ДО МАНЕВРОВАНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ ЕНЕРГОБЛОКА

К.т.н., доц. Пугачова Т.М., аспірант Савонюк М.В.

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

tatpch@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Пугачова Т.М.

В даний час графіки електричних навантажень енергетичних систем характеризуються великими нерівномірними: різкими піками навантаження вранці та вечірні години, збої вночі та вихідних, якщо необхідно забезпечити швидке збільшення та зменшення навантажень.

Регулювання електроенергії є одним з основних завдань енергетичних систем, воно повинне бути надійним та економічним. Регулювання електроенергії здійснюється шляхом зміни навантаження або зупинки обладнання ТЕС. Маневреність енергоблока - це важливий аспект, який забезпечує його здатність швидко реагувати на зміни споживання електроенергії.

Маневреність енергоблока розуміється як набір властивостей, які визначають його здатність швидко реагувати на вимогу енергетичної системи змінювати свою потужність, швидко запуснути та припинити, не знижуючи надійність обладнання в неприйнятних межах. Концепція маневреності включає ряд властивостей, що визначають ефективність обладнання в змінних запуску та екстрених режимах. А також маневреність повинна забезпечувати виконання чергового щоденного графіка електричних навантажень.

Маневреність енергоблока залежить від таких факторів:

- швидкість зміни потужності, чим швидше живлення може змінити свою потужність, тим вище його маневреність;
- діапазон змін потужності, чим ширший діапазон змін потужності, тим більше маневреним враховується енергоблок;
- час реакції, це час, який потребує енергоблок для того, щоб почати змінювати свою потужність після отримання команди;
- стабільність роботи, енергоблок повинен підтримувати стабільну роботу при зміні потужності.

Основні маневрові характеристики повинні включати наступні пункти [1]:

- діапазон допустимих навантажень (інтервал навантаження, який блоку живлення може нести необмежений час у часі), регулюючий діапазон навантаження (інтервал навантаження, всередині якого потужність автоматично змінюється без зміни складу допоміжного обладнання);
- початкові характеристики електроенергії (починаючи з різних теплових умов, споживання палива для запуску та зупинки живлення, надійність його

роботи в режимах запуску, вплив вихідних режимів на міцність енергетичного обладнання);

- швидкість клапана та зміна навантаження одиниць потужності (мобільність та прийняття);

- допустима тривалість живлення при навантаженні власних потреб та холостого ходу, можливість працювати в режимі двигуна та синхронний компенсатор;

- можливість перевантаження тощо.

Енергоблок повинен бути оснащений необхідним комплексом автоматичних інструментів управління, забезпечуючи зміну його потужності відповідно до умов його роботи в енергетичній системі.

Конструкція обладнання енергоблоку, а також інструменти контролю та управління, повинна забезпечити можливість використання всіх режимів роботи (включаючи запуск та зупинку) автоматизованого керування всіх систем енергоблоку.

Маневреність парової турбіни визначається її проектуванням та способом роботи.

Основні фактори, що впливають на маневреність парової турбіни енергоблоку:

- тип турбіни - турбіни з регульованими соплами більш маневрені, ніж турбіни з фіксованими соплами;

- швидкість обертання ротора - турбіни з більшою швидкістю обертання ротора більш маневрені;

- наявність системи швидкого пуску - системи швидкого пуску дозволяють турбіні швидко досягти номінальної потужності;

- умови палива - впровадження маневрованих можливостей залежить від умов постачання палива, що також впливає на ефективність роботи енергоблоку;

- технічні вимоги - існують різні вказівки, такі як РД 34.25.104-88, які встановлюють технічні вимоги до маневреності енергетичних пікових блоків [2].

Так для електростанцій потужністю 500 МВт і вище, час пуску не повинен перевищувати 3 години (включаючи час до поштовху турбіни - 2 години 20 хвилин) [3].

Список літератури:

1. Мысак И.С. Повышение маневренности энергоблоков / И.С. Мысак, И.А. Кусков. – Киев: Техника, 1982. – 136 с.

2. РД 34.25.104-88. Технічні вимоги до маневреності енергетичних напівпікових блоків теплових електростанцій з конденсаційними турбінами.

3. Гічов Ю.О. Теплові електростанції і проблеми перетворення електроенергії. Частина 1: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – 59 с.

УДК 536.4

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ РЕА З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЧОВИН, ЩО ПЛАВЛЯТЬСЯ

К.т.н. Волчок В.О., Булгару І.М., Густяков С.О.

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

resvicv@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н. Волчок В.О.

Функціонування та надійність радіоелектронної апаратури (РЕА) істотно залежить від систем забезпечення температурних режимів їх роботи. Як правило, їх стабільна робота пов'язана з необхідністю відведення значних густин потоків теплоти.

Існуючі в даний час пристрої та системи для відведення теплоти та термостатування не завжди відповідають зазначеним вимогам і не для всіх об'єктів можуть бути використані [1].

У роботі розглядається питання розв'язання проблеми безпосередньо пов'язаної з необхідністю розробки та всебічного дослідження систем охолодження РЕА з використанням речовин, що плавляться, застосування яких у різних галузях науки та техніки дозволить вирішити завдання температурної стабілізації та керування режимами приладів та пристроїв з високими тепловими навантаженнями.

Існує ряд радіоелектронних приладів, що піддаються періодичним короткочасним тепловим навантаженням [2]. Для забезпечення їх температурних режимів роботи можуть бути використані системи охолодження, що працюють як у безперервному, так і у перервному режимі.

У цих умовах доцільним є розміщення між елементом РЕА та системою охолодження теплового акумулятора, здатного на якийсь час підтримати температуру радіоелемента на необхідному рівні, незважаючи на теплоприпливи через гілки конструкції теплоприладу, що відводить.

Для надійної роботи елемента РЕА в цьому випадку необхідним є наявність достатньої кількості робочої речовини, що плавиться для акумуляції кількості теплоти, що виділяється, а також періодичність перерв між включеннями апаратури, щоб за цей час робоча речовина встигла затвердіти до наступного циклу включення РЕА.

Типовий пристрій для охолодження апаратури такого типу являє собою тонкостінну металеву ємність, заповнену робочою речовиною, на яку встановлюються тепловиділяючі елементи РЕА з хорошим тепловим контактом. Тепло, що розсіюється апаратурою, поглинається за рахунок прихованої теплоти плавлення речовини.

В даний час одним з ефективних засобів відведення тепла від елементів РЕА, що працюють в імпульсному режимі, є застосування в пристроях для їх охолодження і термостабілізації робочих речовин, що володіють відносно великою теплою фазових перетворень і надійною багаторазовою оборотністю

фазових перетворень.

Досліджено роботу пристрою, що дозволяє використовувати систему охолодження з речовинами, що плавляться, при незначних проміжках часу в перервах роботи циклічно працюючої апаратури.

Конструкція дослідного пристрою показано на рис. 1. Пристрій складається з тонкостінної металевої ємності 5, заповненої робочими речовинами 1, на яку встановлюються із забезпеченням гарного теплового контакту тепловиділяючий елемент РЕА 2 у вигляді електронагрівача. До протилежної сторони металевої ємності припаяний своїм холодним спаєм термоелектричний пристрій (ТЕП) 7, яка оснащена радіатором 8.

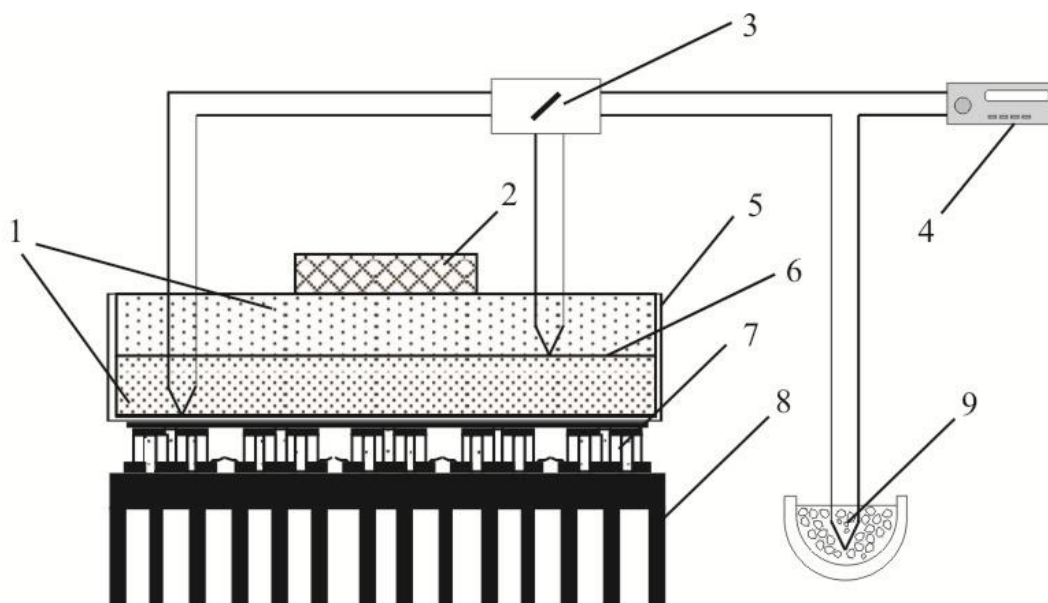


Рисунок 1 – Схема установки для визначення температурних режимів:

1 – робочі речовини; 2 – нагрівач; 3 – перемикач термопар; 4 – мілівольтметр;
5 – металева ємність; 6 – перегородка; 7 – термоелектричний пристрій;
8 – радіатор; 9 – холодний спай термопари

Досліджувальний зразок охолоджувальної системи був ємністю, виконаною у вигляді плоского циліндра. Внутрішній об'єм був розділений горизонтальною алюмінієвою перегородкою на два відсіки, заповнених робочими речовинами (пальмітиновою кислотою та парафіном). Товщина кожного наповнювача складала 1,5 см. При дослідженні процесу плавлення на торцеву поверхню, яка мала контакт з пальмітиновою кислотою, встановлювалося джерело тепловиділень, в якості якого використовувався плоский нагрівач, що живився від джерела електричного струму.

Для додаткового відведення тепла від контейнера з двома робочими речовинами використана термоелектрична батарея та радіатор. Для визначення основних параметрів дослідного зразка при випробуваннях замірялися напруга та струм на електронагрівачі та ТЕП; температура на верхній та нижній торцевих поверхнях дослідного зразка, температури на гарячому спаї ТЕП.

Для порівняльного аналізу систем охолодження з одним наповнювачем та декількома наповнювачами крім дослідного зразка, що містить дві робочі

речовини, виготовлено макет, що містить один наповнювач – пальмітинову кислоту. Конструкція зазначеного зразка аналогічна до описаної раніше. Товщина наповнювача становила 3 см.

Результати досліджень представлено у вигляді графіків залежностей зміни температури оболонки дослідного зразка в часі при плавленні та затвердінні робочої речовини, а також тривалості повного розплавлення (затвердіння) робочого агента від потужності, що підводиться (відводиться).

На рис. 2 представлена залежність зміни температури оболонки пристрою від часу при плавленні речовини для випадку використання одного наповнювача (пальмітинової кислоти) (крива 1), двох наповнювачів (пальмітинової кислоти та парафіну) (крива 2).

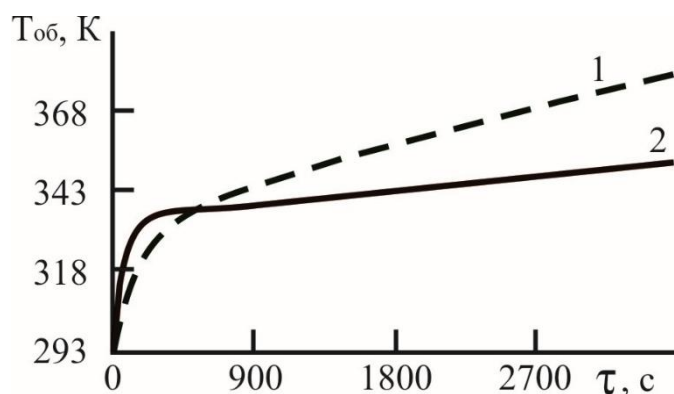


Рисунок 2 – Залежність зміни температури оболонки від часу плавлення речовини

З отриманих даних випливає, що температура оболонки пристрою підтримувалася найбільш стабільною при застосуванні двох наповнювачів. При цьому зростання температури в інтервалі від 200 до 3600 з початку процесу плавлення становило не більше 17 К, у той час як при використанні одного наповнювача зростання перевищувало 55 К.

На рис. 3 показано залежність часу повного проплавлення робочих речовин для випадку використання в охолоджувальному пристрої одного наповнювача (крива 1) та двох наповнювачів (крива 2) від потужності, що виділяється елементом РЕА на одиницю площі.

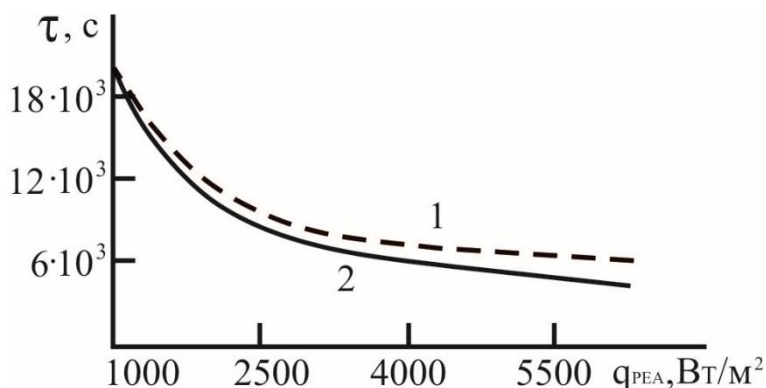


Рисунок 3 – Залежність часу повного проплавлення речовини від потужності РЕА

Вимірювання проводилися за різних значень потужності електронагрівача та струмів живлення ТЕП. Отримані криві демонструють залежність температури оболонки та тривалості плавлення робочої речовини від величини теплового навантаження на охолоджувальний пристрій, від типу робочої речовини, а також від умов теплообміну з навколишнім середовищем. Оскільки за відсутності конвективних потоків у рідкій фазі процес теплообміну є нестационарним процесом теплопровідності, температура оболонки пристрою постійно зростає. Швидкість зростання залежить від тепла, що підводиться до оболонки (величини q_{PEA}), від товщини шару та від теплопровідності речовини. Збільшення значення q_{PEA} значно підвищує температуру оболонки та елемента РЕА, а також швидкість плавлення речовини (наприклад, після 1,5 годин роботи елемента РЕА при зміні його потужності розсіювання з 1000 до 3000 Вт/м² температура оболонки підвищувалася з 317 до 367 К, а швидкість плавлення збільшувалася з 10^{-6} до $3.7 \cdot 10^{-6}$ м/с).

Дослідження показали, що застосування для відведення тепла від робочого агента ТЕП з величиною потужності, що відводиться 5 - 6 Вт, дозволить скоротити час його охолодження в 3 - 4 рази у порівнянні з використанням природного теплообміну з навколишнім середовищем.

Список літератури:

1. Троцишин І.В. Фізичні основи електронних приладів: навч. посібник / І.В. Троцишин – Хмельницький: ХДУ. – 2004. – 488 с.
2. Нікольський О.І. Моделювання теплових процесів в РЕА: навч. посібник / О.І. Нікольський, О.П. Шеремета. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 116 с.

УДК 628.47

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

К.т.н., доц. Тарасенко М.О.¹, к.т.н., доц. Тарасенко О.М.¹,

Чупріна Л.О.¹, Солодовник Ю.Ю.²

¹Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

²Харківський національний університет

міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків

alexstar552@gmail.com

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

В результаті повсякденної діяльності підприємств транспортної промисловості утворюються тони відходів, що мають різний морфологічний та фракційний склад. Особливо варто відзначити великі міжнародні аеропорти та залізничні вокзали, де накопичення відходів становить понад 1000 кг/добу. Накопичення великої кількості відходів у радіусі до 15 км призводить до виникнення великого скупчення птахів, що призводить до загрози виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації літаків. Тверді відходи, які вивантажують з літаків та поїздів міжнародних рейсів, не бажано вивозити на полігони твердих побутових відходів. З метою зниження шкоди для екології тверді відходи зазнають термічної утилізації. Установки термічної утилізації (спалювання) рекомендується в наступних випадках: в відходах вміст органічної речовини менше 30 % та при відсутності сміттєпереробних заводів в радіусі 15 км.

Склад, властивості та обсяг накопичення твердих відходів змінюються в залежності від кліматичних умов, періодів року, ступеня благоустрою вокзалів, їх пропускної спроможності та географічного положення. Середньодобові норми накопичення твердих відходів на основних об'єктах наведені в нормах технологічного проектування. Основними компонентами відходів є: пластик 50÷70 %; папір 15÷30%; харчові відходи 10÷30% [1].

Переваги термічної утилізації відходів:

- не вимагає великої земельної ділянки для розміщення сміттєспалювального обладнання;
- виключає необхідність транспортування відходів на значні відстані до місця їх збору або переробки і тим самим економити транспортні витрати, знижує потребу у сміттєзбірній техніці;
- забезпечує повне знезараження відходів, що володіють високою інфікованістю та підвищеними санітарними вимогами до їх знезараження (відходи, що утворюються в готелі, аеровокзальному комплексі, у пунктах служби побуту, медичних пунктах тощо);
- внаслідок високої теплотворної здатності спалюваних відходів (14÷22 МДж/кг) дозволяє економити природний газ та електричну

енергію в системі опалення та горячого водопостачання;

- забезпечує високу ступінь механізації та автоматизації основних операцій, а також зниження до мінімуму кількості обслуговуючого персоналу [2].

Технологічний процес термічного знищення твердих відходів повинен включати механізовану транспортування відходів до станції, вивантаження відходів в бункер-накопичувач, механізовану подачу відходів до приймального бункера сміттєспалювальної печі, спалювання відходів в печі, механізоване видалення золи та шлаку з печі.

В топковій камері рекомендується застосування шарового способу спалення відходів. Цей спосіб максимально спрощує експлуатацію установки, має широкий діапазон навантаження, не потребує складної системи паливопідготовки. В зв'язку з постійною зміною складу відходів, для стабільної роботи установки, в топкову камеру необхідно подавати природний газ або рідке паливо. Кількість палива визначається на підставі теплового розрахунку в залежності від складу відходів та режиму роботи. На стадії горіння згорають в основному летючі складники відходів і повинні бути забезпечені хороші умови займання і постійний контакт з великою кількістю повітря [3].

Теплоту димових газів, що утворюються при спалюванні відходів, доцільно використовувати в системі опалення та горячого водопостачання.

Установка продуктивністю 100 кг/год здатна виробляти кількість теплоти більше 1100 МДж/год.

За теплотехнічних властивостях загальна маса твердих відходів близька за властивостями до горіння дерева і дерев'яних виробів з тією лише різницею, що при спалюванні відходів виділяються сполуки сірки, зокрема сірчистий ангідрид. Для уловлювання небезпечних компонентів, що входять до складу димових газів, в топковій камері необхідно передбачити пристрій для додавання різноманітних речовин (CaO , MgO , вапно Ca(OH)_2 або вапняк CaCO_3) та систему фільтрації димових газів на виході з установки.

У результаті проведених розрахунків було спроектовано конструкцію сміттєспалювальної установки продуктивністю 100 кг/год, що працює на побутових відходах та дизельному пальному. Час роботи – цілодобово, 5 днів на тиждень, 50 тижнів на рік [4].

Таблиця 1

Склад відходів

Вид відходів	Склад, %	Склад сухої маси						Волога, %
		С	Н	О	N	S	Зола	
Пластик	65	60	7,2	22,6	-	-	5	3
Бумага	25	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6	6
Харчові	10	48	6,4	37,6	2,6	0,4	4	30

Паливо для розігріву установки – дизельне, витрата 30 % по теплу від

теплової потужності печі. Теплотворна здатність 42,4 МДж/кг.

Таблиця 2

Результати теплового та аеродинамічного розрахунку

Найменування величини	Значення
Сумарна теплотворна здатність відходів Q_n^p , МДж/кг	22,8
Повна витрата дизельного палива В, кг/год	10,5
Температура димових газів на виході з топкової камери t_r , °С	1089
Температура димових газів на виході з котла-утилізатора $t_{вц}$, °С	120
Температура води на вході в котел-утилізатор $t'_в$, °С	65
Температура води на виході з котла-утилізатора $t'_в$, °С	85
Масова витрата води G, т/год	12,2
Площа поверхні нагріву F, м ²	10
Аеродинамічний опір котла-утилізатора ΔP , Па	55
Аеродинамічний опір циклону ΔP , Па	144
Площа фільтрації рукавного фільтра S, м ²	20,2

Були розроблені заходи щодо охорони праці та навколишнього середовища, що забезпечують найбільш безпечну роботу персоналу, експлуатацію обладнання та припустимі параметри шкідливих викидів у навколишнє середовище (атмосферу).

Список літератури:

1. Український науково-дослідний інститут цивільного захисту Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2015 рік. – Київ, 2016. – 363 с.
2. Охріменко О. В. Методи переробки твердих побутових відходів / О.В. Охріменко, Л.П. Вогнівенко, Т.А. Біла // Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки. – 2018. – Вип. 101. – С. 214-219.
3. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння: навчальний посібник / С.М. Пономаренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 85 с.
4. Ткаченко С.Й. Котельні установки: навчальний посібник / С.Й. Ткаченко, Д.В. Степанов, Л.А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 185 с.

УДК 621.311

ГРАФІКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА МЕТОДИ ЇХ ПОКРИТТЯ

К.т.н., доц. Пугачова Т.М., аспірант Олізаренко В.О.

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

tatpch@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Пугачова Т.М.

Стабільне та якісне постачання енергією споживачів є однією з необхідних умов економічного розвитку країни. Одним із проблемних питань функціонування систем енергопостачання є нерівномірність графіка навантаження. Проблема покриття нерівномірності графіків електричного навантаження характерна для будь-якої енергосистеми світу. Постійно зростаюча нерівномірність споживання електроенергії в часі, що досягає в ряді енергосистем протягом доби 40–45 %, а також можливість частих скидів навантаження при великій протяжності ліній електропередачі вимагають від енергоблоків, в тому числі, найбільш потужних і економічних, активної участі в оперативному і аварійному регулювання частоти та потужності енергосистеми [1].

Основу теплоенергетики України становлять енергоблоки потужністю 200 і 300 МВт. На разі на українських ТЕС експлуатуються 43 конденсаційних блоки потужністю 200 МВт з турбінами К-200-130 і 42 блоки з турбінами К-300-240. Значна частина тепломеханічного обладнання вже виробила нормативний і продовжений ресурси.

Типовий графік електричного навантаження Об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України нерівномірний. Так наприклад, у зимові місяці при проходженні максимальних навантажень у вечірні години зимових періодів навантаження складає на рівні 20 ГВт при середньодобовій температурою по Україні $-6,1^{\circ}\text{C}$. Покриття енергоспоживання при цьому забезпечують АЕС, ТЕС, ТЕЦ, ГЕС, ГАЕС і навіть поновлювані джерела енергії. При цьому в роботі може перебувати до 38 пилувугільних енергоблоків ТЕС генеруючих компаній із сумарною потужністю 6,6 ГВт. Атомні електростанції працюють з навантаженням 10,8 ГВт.

Наступного дня при зниженні температури зовнішнього повітря покриття ОЕС України складає 22,5 ГВт. В роботі брали участь 42 пилувугільних енергоблоків ТЕС ГК потужністю 8,0 ГВт. Простіше кажучи, довелося включити додатково 4 вугільних енергоблоків [2].

Баланс між споживанням і генерацією досягається за рахунок зміни навантаження ГЕС і ТЕС, але навантаження ТЕС змінюється в обмеженому діапазоні, що зазвичай не перевищує 30% від встановленої потужності енергоблоку. Залежно від сезону, цей діапазон сумарно в ОЕС України становить від 1,4 до 2 ГВт.

Така сама ситуація відбувається між денним та нічним споживанням.

Залишається близько 1,5 ГВт нерегульованої різниці між піковим і базовим навантаженням. Проблему доводиться вирішувати за рахунок зупинок на ніч з подальшим пуском вранці пилувугільних, газомазутних блоків ТЕС. У деякі періоди кількість таких операцій доходить до 15 пусків / зупинок на добу.

Така експлуатація призводить до додаткових витрат газу і вугілля для забезпечення цих пусків, значного погіршення техніко-економічних показників роботи обладнання а також до прискорення зносу обладнання енергоблоків і зростання кількості аварійних ремонтів.

Для збалансування споживання енергосистеми необхідно маневрувати (зупиняти на ніч і пускати вранці) в тому числі пилувугільними енергоблоками 300 МВт, які спроектовані для роботи в базовому режимі і мають дуже обмежений ресурс для пусків.

Збільшується частина обладнання, що внаслідок зростаючої нерівномірності графіка електричного навантаження експлуатується в маневрених режимах. Експлуатація енергоблоків у режимах пікового навантаження з великою кількістю пусків - зупинів особливо небезпечна в сучасних умовах скорочення обсягів планових ремонтів та збільшення міжремонтних періодів.

При пусках і зупинках турбіни на поверхні ротора виникають термічні напруги, які обумовлюють досягнення в зонах концентрації високих сумарних напруг, які приводять до утворення тріщин у високотемпературних зонах елементів турбоустановок.

Значне збільшення останнього десятиліття потужностей нетрадиційної енергетики, і навіть зміна характеру споживання електричної енергії, поставило низку завдань, вирішення яких сьогодні пріоритетним. До основних слід віднести завдання підвищення ефективності роботи устаткування ТЕС, покриття змінної частини електричних навантажень.

Експлуатація сучасних енергоблоків повинна відповідати вимогами маневреності та надійності, визначатися загальними умовами енергетичної системи. Діяльність енергетичних систем підпадає під дію щорічних та щоденних графіків споживання енергії, що визначається структурою генерування потужностей в енергетичних системах, їх стану та технічній інфраструктурі.

Список літератури:

1. Маляренко В.А. Нерівномірність графіка навантаження енергосистеми і способи його вирівнювання / В.А. Маляренко, І.Д. Колотило, І.Е. Нечмоглод // *Енергосбережение. Енергетика. Енергоаудит.* – 2011. – №5(87). – С. 19 – 22.
2. Маляренко В.А. Неравномерность графика нагрузки энергосистемы и способы ее выравнивания / В.А. Маляренко, І.Е. Нечмоглод // *Світлотехніка та електроенергетика.* – 2011. – №4. – С. 61-66.

УДК 621.438:620.91:504.05

ВПРОВАДЖЕННЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ЯК ІНСТРУМЕНТ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

Ас. Беднарська І.С., Яценко С.С.

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

innabednarska1@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Вступ. Внаслідок повномасштабної війни в Україні значна частина енергетичної інфраструктури країни зазнала пошкоджень або була повністю зруйнована. Особливо критичними є втрати серед пікових і напівпікових генеруючих потужностей, що спричинило нестабільність в енергозабезпеченні міст і регіонів. У цих умовах модернізація енергетичних систем набуває вирішального значення.

Одним із найбільш ефективних та гнучких рішень є впровадження газотурбінних установок (ГТУ). Їх використання дозволяє не лише відновити енергопостачання, а й підвищити його ефективність, зменшити вплив на довкілля та забезпечити поступ до енергетичної незалежності [1].

Метою роботи є техніко-економічне та екологічне обґрунтування впровадження нової теплоелектростанції (ТЕЦ) на базі ГТУ українського виробництва у місті з пошкодженою енергетичною інфраструктурою. Передбачено утилізацію тепла вихлопних газів у котлах-утилізаторах для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії.

Основні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан об'єктів теплоенергетики в Україні.
2. Вивчити технічні параметри газотурбінних установок, у т. ч. за складними термодинамічними циклами.
3. Розробити принципову теплову схему ТЕЦ із включенням ГТУ.
4. Провести економічну оцінку доцільності проекту.
5. Здійснити екологічний аналіз, включаючи розрахунок скорочення викидів парникових газів.

Наукова новизна. Запропоновано ефективне використання технологій STIG, "Водолій", парогазових циклів, що дозволяють суттєво підвищити к.к.д. установки без перевищення температурних обмежень для конструкційних матеріалів. Вперше для українських умов у масштабі малих міст запропоновано інтегровану схему когенерації на базі ГТУ.

Основні результати. Енергетична ефективність: запропонована система дозволяє досягти загального к.к.д. до 60%, що перевищує показники традиційних ТЕС. Споживання природного газу становить близько 88,5 млн нм³/рік.

Скорочення викидів: викиди CO₂ при новій когенераційній схемі скорочуються на 325 тис. тонн за 5 років. За весь життєвий цикл (15 років) – до

575 тис. тонн CO₂-екв.

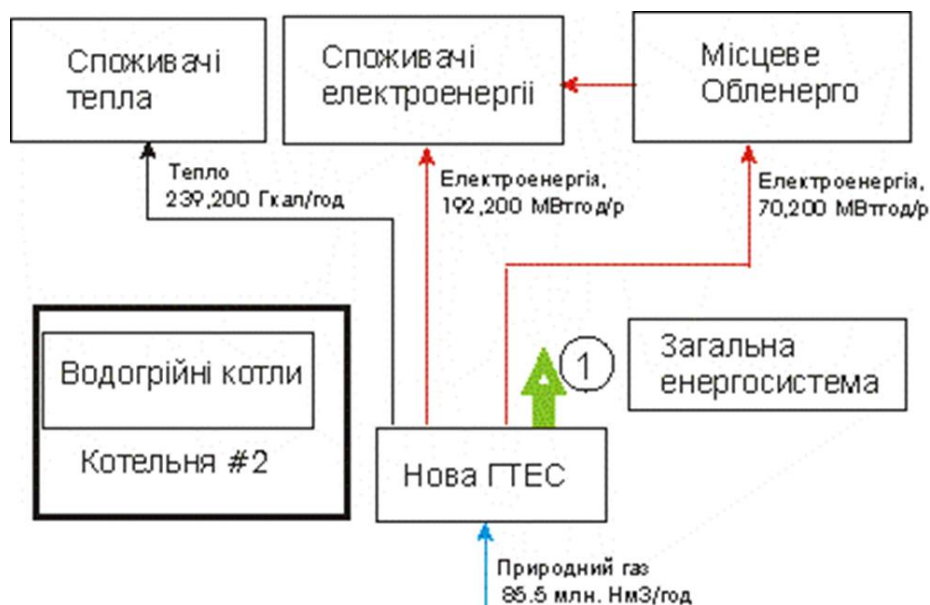


Рисунок 1 – Запропонована схема з впровадженням ТЕС на базі ГТУ

Економічна доцільність: очікуваний дохід від продажу одиниць скорочення викидів (ОСВ) – понад 11,5 млн грн.

Соціальний ефект: створення робочих місць на етапі будівництва і для експлуатації ГТЕС. Підвищення надійності постачання енергії сприяє розвитку малого та середнього бізнесу.

Екологічна оцінка. Атмосфера: зменшення викидів CO₂, NO_x, CO_x майже вдвічі у порівнянні з вугільними ТЕС [1]. Вода: обмежений негативний вплив, що виникає лише під час миття двигунів і заміни мастил. Шум: у межах санітарних норм, з можливістю локалізації через ізоляцію. Повітря: згідно з ДБН, концентрації забруднювачів регулюються висотою димових труб [2].

Висновки. Використання газотурбінних установок у місцевих теплоелектростанціях є перспективним кроком для модернізації енергетичної системи України. ГТУ забезпечують високу ефективність, гнучкість і екологічну безпечність, сприяючи сталому розвитку, зменшенню енергозалежності та наближенню до європейських стандартів енергетики.

Реалізація запропонованого проекту дозволяє не лише вирішити нагальні потреби регіонів, а й сформувати базу для довгострокового економічного та екологічного зростання.

Список літератури:

1. Конеченков А. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни [Електронний ресурс] / А. Конеченков; за ред. В. Омельченка // Разумков центр. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-dopid-chas-ta-pislya-viyny>. – Назва з екрана.

2. Боженко М.Ф. Джерела теплопостачання та споживачі теплоти: Навч. посіб./ М.Ф. Боженко, В.П. Сало. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. – 192 с.

Секція 3

Нетрадиційна та відновлювана енергетика

УДК 620.9

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ФРЕОНІ R290

Доктор філософії (PhD), наук. співроб. Горський В.В., аспірант Дзюбан Ю.І.
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ
Horskyi_VV@nas.gov.ua

Енергоефективність тваринницьких комплексів відіграє ключову роль у зниженні виробничих витрат, підвищенні конкурентоспроможності підприємств і мінімізації негативного впливу на довкілля. Висока енергоемність технологічних процесів, залежність від традиційних енергоносіїв та екологічні виклики вимагають впровадження сучасних рішень, зокрема відновлюваних джерел енергії. В умовах зростаючої конкуренції як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках агропромислові підприємства все активніше впроваджують енергоефективні технології, серед яких біогазові установки, біопаливні котли, сонячні панелі та теплонасосні системи, що дозволяють скоротити використання викопного палива та знизити рівень забруднення навколишнього середовища [1–6].

Україна витрачає на 1 га ріллі дизельного пального приблизно стільки ж, як і промислово розвинені країни Європи, такі як Німеччина, Франція та Велика Британія. Водночас, через значно нижчу врожайність сільськогосподарських культур і продуктивність тваринництва, енергоспоживання на одиницю виробленої продукції в Україні є у 2–3 рази вищим у рослинництві та у 4–5 разів більшим у тваринництві порівняно з цими країнами. Вихід із цієї ситуації полягає у впровадженні сучасних енерго- та ресурсозберігаючих технологій, застосуванні інноваційних технічних рішень, а також активному використанні відновлюваних та альтернативних джерел енергії, що дозволить одночасно підвищити врожайність і продуктивність тваринницьких господарств [7].

Застосування високотемпературних теплових насосів типу "повітря-вода" із фреоном R290 для підігріву гарячої води у технологічних процесах тваринницьких комплексів є перспективним рішенням, що забезпечує значну економію енергії та знижує екологічне навантаження. Завдяки високому коефіцієнту перетворення такі системи дозволяють ефективно використовувати низькопотенційну енергію навколишнього середовища для покриття потреб виробництва.

Для аналізу ефективності впровадження теплових насосів (ТН) у тваринницьких комплексах порівняно з традиційними електричними водонагрівачами було реалізовано систему типу «повітря-вода» на одному з господарств у Полтавській області, що спеціалізується на виробництві молочної продукції. Дослідження проводили на тваринницькому комплексі, який на

вересень 2024 року утримував 480 голів молочних корів. Для експерименту було обрано окреме приміщення, розраховане на 194 корови, де організовано окремий облік споживання електроенергії та води, що дозволяє точно оцінити ефективність енергетичних рішень та визначити їх вплив на загальні витрати господарства.

Однією з ключових технологічних потреб комплексу є приготування гарячої води для санітарної обробки молокопроводів, що є обов'язковим заходом для забезпечення гігієнічної якості молока та попередження розмноження шкідливих бактерій. Вода підігрівається до температури 70°C, що відповідає вимогам санітарних норм і гарантує ефективне знезараження обладнання. До впровадження теплового насоса гаряча вода отримувалася за допомогою електричного бойлера марки «Титан» об'ємом 400 літрів, який мав електричну потужність 24 кВт. Це обладнання споживало значну кількість електроенергії, що впливало на загальні експлуатаційні витрати господарства та створювало додаткове навантаження на електромережу комплексу.

Для оцінки фактичного енергоспоживання електричного бойлера було проведено дослідження протягом шести днів. У цей період добове споживання електроенергії бойлером коливалося в межах 186–201 кВт·год, а середньодобове значення склало 193,33 кВт·год. Обсяг гарячої води, необхідний для санітарної обробки молочного обладнання, також змінювався в межах 2876–3212 літрів на добу, з середнім показником 3018 літрів на добу.

З метою оптимізації енергоспоживання та зменшення витрат на підігрів води було прийнято рішення про встановлення високотемпературного теплового насоса типу «повітря-вода». Вибір обладнання базувався на його технічних характеристиках, економічній ефективності та стабільності роботи системи. Тому було обрано повітряний тепловий насос «Hajster Nebo» тепловою потужністю 19 кВт [8], з огляду на його технічні характеристики та економічну доцільність. У цій установці використовується холодоагент R290 (пропан), що дозволяє отримувати теплоносії із температурою до 75°C, забезпечуючи енергоефективне виробництво гарячої води.

Після завершення монтажних і пуско-налагоджувальних робіт було розпочато дослідження ефективності роботи теплового насоса типу «повітря-вода» у реальних умовах експлуатації. Заміри споживання електричної енергії проводилися протягом шести днів у період з 23 по 28 вересня 2024 року. У ході вимірювань аналізувалися як безпосередні витрати електроенергії на роботу теплового насоса, так і обсяги гарячої води, необхідної для технологічних процесів молочної ферми.

За результатами досліджень середнє споживання електроенергії тепловим насосом становило 40 кВт·год на добу, що є значним зниженням у порівнянні з попереднім рівнем енергоспоживання. Водночас було визначено, що середній коефіцієнт перетворення енергії (COP) для встановленого обладнання за досліджуваний період склав 2,88, що свідчить про ефективність використання електроенергії для виробництва теплової енергії.

Застосування високотемпературного теплового насоса у комплексі з модернізацією системи теплозабезпечення дозволило досягти суттєвого

скорочення витрат електроенергії. Якщо до впровадження нового обладнання середнє добове споживання електроенергії для нагріву води становило 193 кВт·год, то після встановлення теплового насоса цей показник зменшився до 40 кВт·год. Таким чином, модернізація теплопостачання сприяла скороченню витрат електроенергії більш ніж у 4,8 рази, що суттєво знизило експлуатаційні витрати господарства.

Окрім зменшення енергоспоживання, впровадження теплового насоса забезпечило стабільне та ефективне гаряче водопостачання. Температурні параметри гарячої води залишалися на необхідному рівні для забезпечення належної санітарної обробки обладнання, а автоматизація роботи теплового насоса дозволила оптимізувати процеси підігріву та розподілу гарячої води на фермі. Це, у свою чергу, позитивно вплинуло на якість кінцевої продукції та загальну ефективність господарства.

Список літератури:

1. Стаднік М.І. Метод покриття графіку навантаження тваринницької ферми при автономному електропостачанні, на базі біогазових установок / М.І. Стаднік, А.В. Грицун, Д.П. Проценко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2019. – № 4(107). – С. 79–87.
2. Стаднік М.І. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії / М.І. Стаднік, Д.П. Проценко, С.М. Бабій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 4. – С. 32–41.
3. Гайдукевич С.В. Шляхи підвищення енергоефективності тваринницьких приміщень / С.В. Гайдукевич, Н.П. Семенова // Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22 грудня 2022 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Харків, 2022. – С. 30-31.
4. Довбненко О.Ф. Обґрунтування режимів роботи теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Довбненко О.Ф.; ННЦ «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН України. – Глеваха, 2011. – 24 с.
5. Мельничук О.В. Підвищення ефективності використання сонячної та вітрової енергії для теплопостачання підприємств АПК. Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра. Житомир: Поліський національний університет МОН України, 2020. – 30 с.
6. Болтянська Н.І. Напрямки підвищення ефективності використання енергоресурсів в тваринництві / Н.І. Болтянська, О.В. Болтянський, Б.В. Болтянський // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2021. – Вип. 11, Т. 1. – 12 с.
7. Симборський А.І. Техніко-економічні показники розвитку сільськогосподарського виробництва та емісія парникових газів в Україні / А.І. Симборський // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 3(34). – С. 60-65.
8. Теплові насоси для дому від компанії Hajster [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hajster.com> (дата звернення: 22, Березень 2025). – Назва з екрану.

УДК 620.92

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІТРОПАРКУ У ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SYSTEM ADVISOR MODEL

Клішня С.С., 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.

Сьогодні вітер займає центральне місце в стратегії енергетичної безпеки та економіки Європи. Лише вітрова енергетика забезпечує внесок у 42 мільярди євро у ВВП Євросоюзу. За даними організації Wind Europe, на даний час вітер задовольняє 17% попиту на електроенергію в Європі. Водночас, у багатьох країнах Європи цей показник є значно вищим: у Данії він становить 55%, в Ірландії – 34%, у Великобританії – 28%, у Португалії – 26%, в Німеччині – 26%, в Іспанії – 25%. Комісія ЄС прогнозує, що до 2050 року вітер забезпечуватиме половину електроенергії в Європі, а потужність вітрової енергії зросте із сьогоднішніх 205 ГВт до 1300 ГВт. Для цього лише протягом 2024-2027 років у ЄС планують будувати щонайменше 18 ГВт нових потужностей на рік [1].

При плануванні будівництва вітроенергетичної станції оцінка виробітку енергії на площадці є визначальною для розрахунку її ефективності. По всьому світу реалізуються масштабні проекти будівництва потужних вітропарків. Найважливішим фактором будівництва вітроелектростанції є геолокація місцевості та притаманна їй швидкість вітру. Для обґрунтування доцільності проекту треба проводити різноманітні попередні дослідження, серед яких не останнє місце займає комп'ютерне моделювання.

Метою роботи є моделювання та дослідження роботи вітропарку у програмному середовищі System Advisor Model.

Розробником програмного середовища System Advisor Model (SAM) виступає Національна лабораторія відновлюваних джерел енергії (The National Renewable Energy Laboratory – NREL, США) [2]. Програмне середовище є офіційно безкоштовним і не потребує ліцензії для використання на персональних комп'ютерах. Це є додатковим стимулом використання System Advisor Model не тільки у дослідницьких проектах, але й в учбовому процесі.

До недавнього часу перешкодою була відсутність спеціалізованих *grw*-файлів вітрових ресурсів для європейських регіонів, що створює проблему універсальності застосування System Advisor Model. Розроблений алгоритм створення *grw* файлів вітрового ресурсу для регіонів, неохоплених базою даних NREL's WIND Toolkit, на підставі наявних погодніх файлів для даних місцевостей з інших джерел, зняв це питання [3].

Об'єктом дослідження в роботі є вітроенергетична станція (ВЕС) “Старий Самбір - 2”, загальною потужністю 20,7 МВт. Ця станція розташована біля міста Старий Самбір Львівської області, складається з шести вітротурбін фірми Vestas типу V126-3,45, одиничною потужністю 3,45 МВт кожна. На рис. 1

наведено план-схему ВЕС “Старий Самбір - 2” з точними координатами розташування кожної ВЕУ.

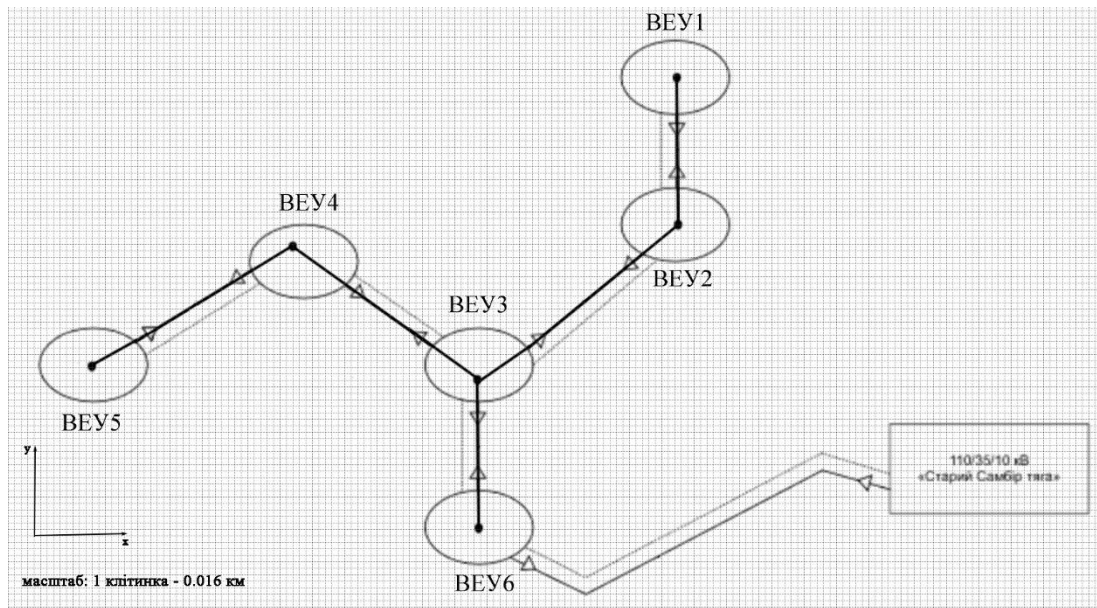


Рисунок 1 – Масштабована координатна сітка з реальним розміщенням ВЕУ у складі вітропарку “Старий Самбір - 2”

На рис. 2 наведено гістограму вироблення енергії у кВт·год на ВЕС “Старий Самбір - 2” у кожному місяці, отриману у програмному середовищі System Advisor Model. Аналіз результатів показує, що найбільше вироблення енергії відбувається у березні та грудні, найменше – у червні, серпні та вересні.

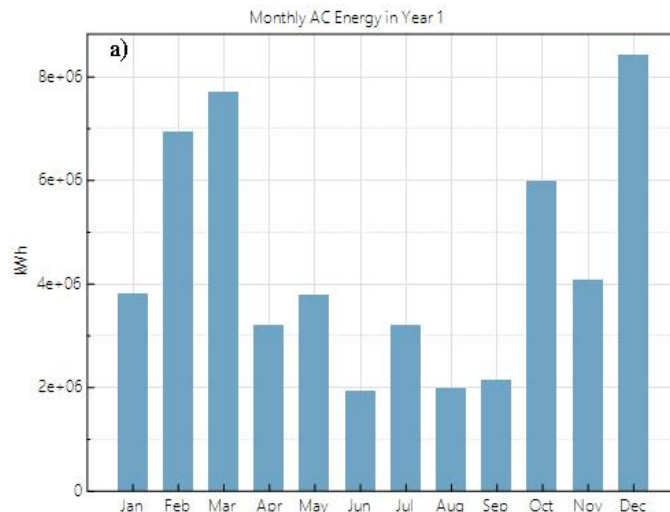


Рисунок 2 – Вироблення енергії у кВт·год на ВЕС “Старий Самбір - 2” у кожному місяці типового року, отримане шляхом моделювання у програмному середовищі System Advisor Model

Аналізуючи залежність генерованої потужності від години доби для кожного місяця (рис.3) можна виділити наступні характерні особливості:

- добові профілі вироблення потужності мають однакову тенденцію для всіх місяців;
- максимальні значення генерації потужності протягом доби спостерігаються у проміжку від 9 до 15 години;
- максимальна генерація спостерігається у березні та грудні, мінімальна – у червні, серпні та вересні.

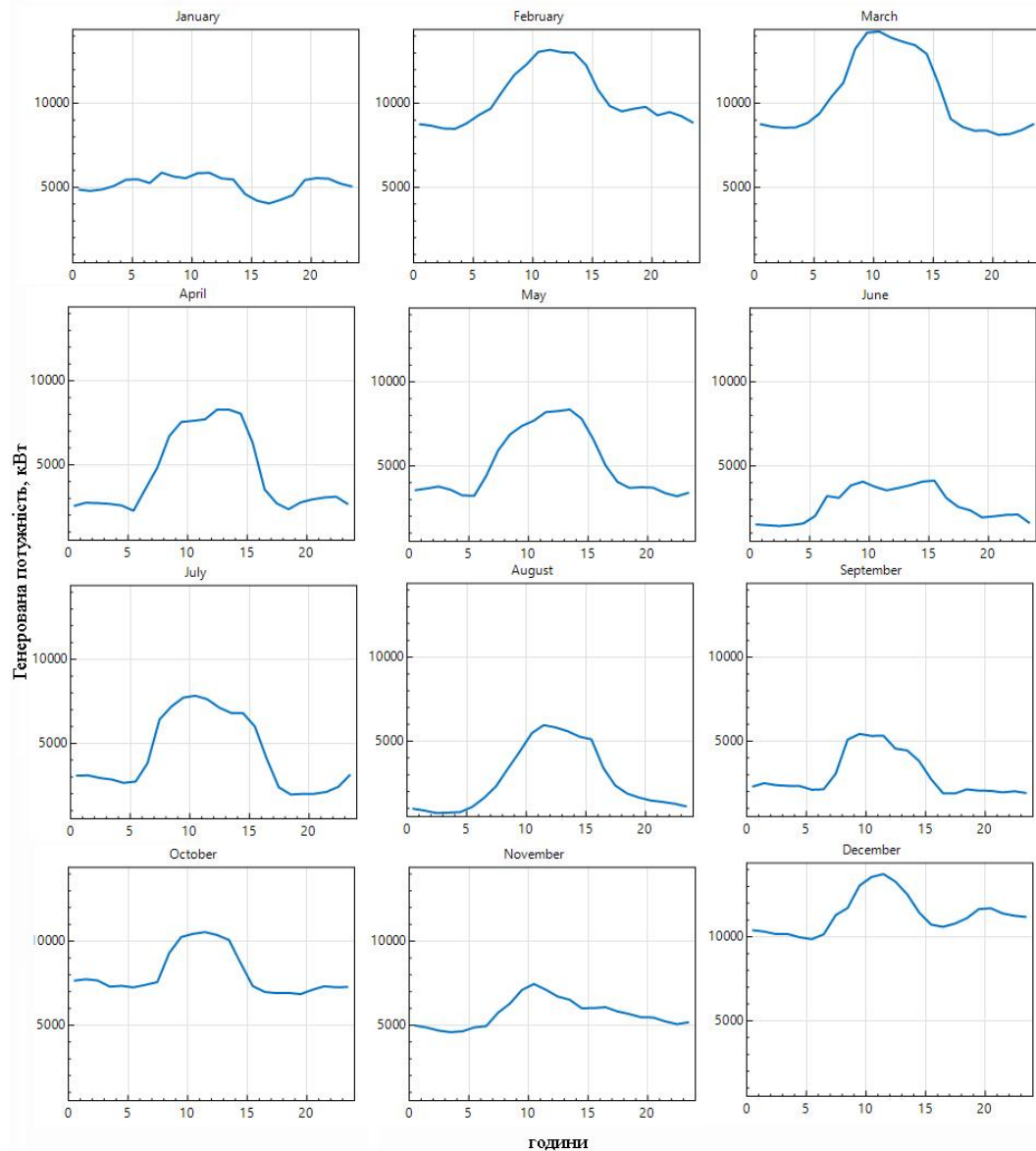


Рисунок 3 – Добова середня погодинна генерація потужності для кожного місяця типового року для ВЕС “Старий Самбір - 2”, отримана шляхом моделювання у програмному середовищі System Advisor Model

Погодинне вироблення енергії показує, що зменшення вироблення енергії на ВЕС відбувається у вечірні та ранкові години, особливо це помітно у літні та осінні місяці.

В табл. 1 наведено порівняння значень середньої річної виробленої енергії на ВЕС “Старий Самбір - 2” за даними модельного експерименту у

програмному середовищі System Advisor Model та за даними безпосереднього вимірювання на об'єкті [4].

Таблиця 1

Конструкційні та енергетичні параметри ВЕС “Старий Самбір - 2”

Кількість ВЕУ у складі ВЕС	6
Висота хабу ВЕУ, м	87
Номінальна потужність однієї ВЕУ, кВт	3450
Загальна потужність ВЕС, кВт	20700
Середня річна вироблена енергія, кВт·год (теоретична, за даними моделювання)	53110636
Середня річна вироблена енергія, кВт·год (реальна, за даними вимірювання на ВЕС) [4]	53150000
Різниця реальної та теоретичної середньої річної виробленої енергії, кВт·год	39364
Відносна різниця, %	0.07

Моделльний експеримент показав дуже добре узгодження з реальними показниками, відносна різниця складає лише 0,07%. Цей факт показує адекватність моделювання і доводить актуальність застосування програмного середовища System Advisor Model для проведення досліджень у вітроенергетиці.

Список літератури:

1. Вітропарки Європи: краса і сила гірських вітрів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.volovetswpp.com/news/vitroparkii-evropi-krasa-i-sila-girskih-vitriv> (дата звернення: 28.04.2025). – Назва з екрану.
2. System Advisor Model (SAM). [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sam.nrel.gov> (дата звернення: 28.04.2025). – Назва з екрану.
3. Кічіянц В.А. Створення спеціалізованих файлів погоди для моделювання вітроенергетичних систем у програмному середовищі System Advisor Model / В.А. Кічіянц, К.А. Колесник, Д.М. Степанчиков // Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні: матеріали VII Всеукраїнської наук.-практ. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти та молодих вчених (29 листопада 2024 р., м. Хмельницький, м. Херсон) / за ред. А.А. Григорової. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. – С. 221-224.
4. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshch D., Hnat H. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 464 p.

УДК 621.311

ОГЛЯД СТАНДАРТІВ IEEE ДЛЯ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ МІКРОМЕРЕЖ

Лещенко П.М.

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

pavlo@pauliceman.com

Науковий керівник: д.т.н., ст.досл. Запорожець А.О.

Згідно із «Концепцією впровадження "розумних мереж" в Україні до 2035 року», «для успішного впровадження "розумних мереж" необхідно використовувати успішний світовий і європейський досвід впровадження "розумних мереж", а також розроблені та апробовані стандарти і рекомендації». Це підкреслює актуальність цієї доповіді, в якій проводиться аналіз ключових стандартів IEEE серій 1547 (підключення розподілених енергетичних ресурсів (PER)) та 2030 (управління та сумісність мікромереж (ММ)).

Згідно із законом України «Про ринок електричної енергії», мікромережа являє собою групу взаємопов'язаних навантажень і розподіленої генерації з визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівні системи розподілу електричної енергії, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати паралельно з об'єднаною енергетичною системою України або в острівному (ізолюваному) режимі мікромережі.

Законом України «Про енергетичну ефективність» система енергетичного менеджменту мікромережі (СЕМ) визначена як система забезпечення функціонування та керування навантаженнями і розподіленою генерацією мікромережі.

Розглянемо серію стандартів IEEE 1547, що є фундаментальною для інтеграції розподілених енергетичних ресурсів (PER) в електричні мережі і, хоча не вона не була розроблена виключно для ММ, широко використовується саме в цій галузі:

– IEEE STD. 1547-2018 [1]: Основний стандарт, що встановлює технічні специфікації та вимоги до тестування для взаємозв'язку та взаємодії PER (сукупною потужністю до 10 МВА) з енергосистемами. Він охоплює важливі для ММ аспекти, зокрема:

- Перехідні режими ММ: стандарт визначає вимоги до процедур переходу в острівний режим (планового та непланового) та повторної синхронізації;
- Регулювання напруги та частоти: стандартом встановлюються допустимі межі для напруги та частоти та вимоги до їх підтримання в ММ;
- Здатність до роботи при відхиленнях: стандарт детально описує вимоги до здатності PER продовжувати роботу під час короткочасних відхилень напруги та частоти, що є критичним для стабільності

системи, особливо при високому рівні використання інверторних джерел;

- Якість електроенергії: стандарт уточнює вимоги до якості електроенергії, роблячи їх більш явними та кількісними;
- Заборона зворотної потужності: стандарт визначає вимоги для запобігання видачі потужності в знеструмлену основну мережу при острівному режимі для безпеки персоналу.

– IEEE STD. 1547.1 [2]: Доповнює основний стандарт, визначаючи процедури тестування відповідності обладнання вимогам IEEE 1547;

– IEEE STD. 1547.3 [3]: Роз'яснює роботу моніторингу, обміну інформацією та керування РЕР для підтримки технічних та бізнес-операцій між учасниками (операторами РЕР, агрегаторами, системним оператором);

– IEEE STD. 1547.6 [4]: Надає рекомендації щодо приєднання РЕР до розподільних мереж, що є особливо актуальним для ММ, які часто проектуються саме на рівні розподілу. Стандарт рекомендує, щоб сукупна потужність РЕР не перевищувала 50% потужності місцевої енергосистеми для підвищення її надійності;

– IEEE STD. 1547.9 [5]: Стандарт спрямований на сприяння стабільній та безпечній роботі накопичувачів енергії у складі РЕР. Зокрема, розглядаються такі аспекти як взаємодія накопичувачів енергії з мережею (інтероперабельність); оперативне керування станом заряду накопичувачів; швидке регулювання частоти; вимоги до безпеки та інтеграції електромобілів із мережею.

Розглянемо серію стандартів IEEE 2030, що фокусується на контексті інтероперабельності в розумних мережах, включаючи специфіку ММ:

– IEEE STD. 2030 [6]: комплексний стандарт IEEE з інтероперабельності розумних мереж, він фокусується на сумісності в інтелектуальних мережах, інтегруючи енергетичні, інформаційні та комунікаційні технології;

– IEEE STD. 2030.6 [7]: розглядає методики оцінки ефективності програм управління попитом (УП) в інтелектуальних мережах. Зокрема, стандарт пропонує: систему показників для моніторингу ефективності програм УП; методи розрахунку базового рівня навантаження; комплексні методи оцінки переваг від реалізації програм УП. Приклади застосування включають оптимізацію роботи ММ з урахуванням УП для зниження витрат та продовження роботи в ізолюваному режимі. Мета стандарту—забезпечити прозору оцінку ефективності програм УП та надати рекомендації щодо їх реалізації в різних умовах енергетичних ринків;

– IEEE STD. 2030.7 [8]: Ключовий стандарт, що визначає функціональні вимоги до контролерів ММ. Він розглядає контролер як елемент, що регулює всі аспекти ММ в точці приєднання та автономно керує операціями, представляючи ММ як єдиний керований об'єкт. Стандарт визначає дві основні функції контролеру ММ:

- Функція диспетчеризації: визначає робочі точки для окремих РЕР та керованих навантажень як у підключеному до мережі, так і в ізолюваному режимах. Отримуються запити від оператора мережі

або ММ і, базуючись на режимі роботи (визначається функцією переходу) та правилах диспетчеризації (заданих оператором або алгоритмом оптимізації), визначаються команди для контролерів окремих елементів;

- Функція переходу: керує переходом ММ між підключеним та ізольованим режимами та процесом повторного підключення (ресинхронізації). Вона виявляє непланове відключення, ініціює планове відключення або підключення, та дає команду функції диспетчеризації виконати відповідний порядок дій для забезпечення успішного та стабільного переходу;
- Стандарт також допускає наявність функцій вищого рівня (наприклад, участь у ринку, оптимізація, самовідновлення).

– IEEE STD. 2030.8 [9]: Доповнює 2030.7, визначаючи єдині процедури тестування для перевірки та кількісної оцінки продуктивності функцій контролеру ММ, незалежно від топології чи конфігурації ММ. Це дозволяє порівнювати різні контролери та забезпечувати їхню взаємодію. Основна увага приділяється тестуванню двох ключових функцій: диспетчеризації та переходу. Сценарії тестування включають реакцію на збурення в системі (коротке замикання, обрив), стабільну роботу після відключення РЕР, зміну робочих точок РЕР, пуск/зупинку найбільшого навантаження, роботу пристроїв регулювання напруги, зміну навантаження. Для функції переходу тестуються планове та непланове відключення, запит на запуск з нуля та повторне підключення. Стандарт надає методологію для всебічної перевірки функцій контролеру ММ. Мета – не лише перевірити працездатність, а й кількісно оцінити продуктивність за стандартизованими метриками, що дозволяє порівнювати рішення різних виробників та гарантувати певний рівень надійності й інтероперабельності.

Стандарти IEEE серії 1547 та 2030, відіграють критично важливу роль у розвитку та впровадженні ММ. Вони надають необхідну технічну базу для забезпечення взаємозв'язку, інтероперабельності, надійного керування та безпечної експлуатації ММ. Стандартизація контролерів ММ та процедур їх тестування є ключовим кроком до створення універсальних, гнучких та надійних систем енергетичного менеджменту. Хоча існують виклики, пов'язані з кібербезпекою, захистом, вартістю та соціальними аспектами, подальший розвиток та дотримання стандартів сприятиме ширшому розповсюдженню ММ як ключових елементів сучасної, стійкої, надійної та ефективної енергетичної інфраструктури.

Список літератури:

1. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. Чинний від 2018-04-06. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112>.
2. IEEE Std 1547.1-2020. IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Energy Resources with Electric Power

Systems. Чинний від 2020-05-21. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9097534>.

3. IEEE Std 1547.3-2023. IEEE Guide for Cybersecurity of Distributed Energy Resources Interconnected with Electric Power Systems. Чинний від 2023-12-11. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2023.10352402>.

4. IEEE Std 1547.6-2011. IEEE Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks. Чинний від 2011-09-12. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6022734>.

5. IEEE Std 1547.9-2022. IEEE Guide for Using IEEE Std 1547 for Interconnection of Energy Storage Distributed Energy Resources with Electric Power Systems. Чинний від 2022-08-05. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9849493>.

6. IEEE Std 2030-2011. IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads. Чинний від 2011-09-10. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.6018239>.

7. IEEE Std 2030.6-2016. IEEE Guide for Assessing Demand Response Resources and Systems. Чинний від 2016-12-16. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7784695>.

8. IEEE Std 2030.7-2017. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. Чинний від 2018-04-23. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8340204>.

9. IEEE Std 2030.8-2018. IEEE Standard for Testing Microgrid Controllers. Чинний від 2018-08-24. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. DOI:<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8444947>.

УДК 621.311

РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

К.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л., Богомол В.В., Денисенко Д.О.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
don.natalia@kntu.edu.ua

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

Впродовж останніх століть енергетична безпека держави стала однією з визначальних складових системи державної безпеки для будь-якої країни. Одним із шляхів вирішення проблем та загроз для енергетичної безпеки України на сьогодні стала відновлювана енергетика [1].

Одним із завдань, які потрібно вирішити задля цього, є якомога максимальне поширення відновлюваної енергетики на регіональних рівнях. Саме оцінювання перспективності вирішення цього завдання на взято окреме масштабне підприємство Товариство з обмеженою відповідальністю «Оператор газотранспортної системи України» на прикладі однієї з газорозподільних станцій лежить в основі даного дослідження [2].

В даній роботі розроблено систему резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для газорозподільної станції, що знаходиться у підпорядкуванні ТОВ Оператор ГТС України.

Генеральний план газорозподільної станції наведено на рис. 1.

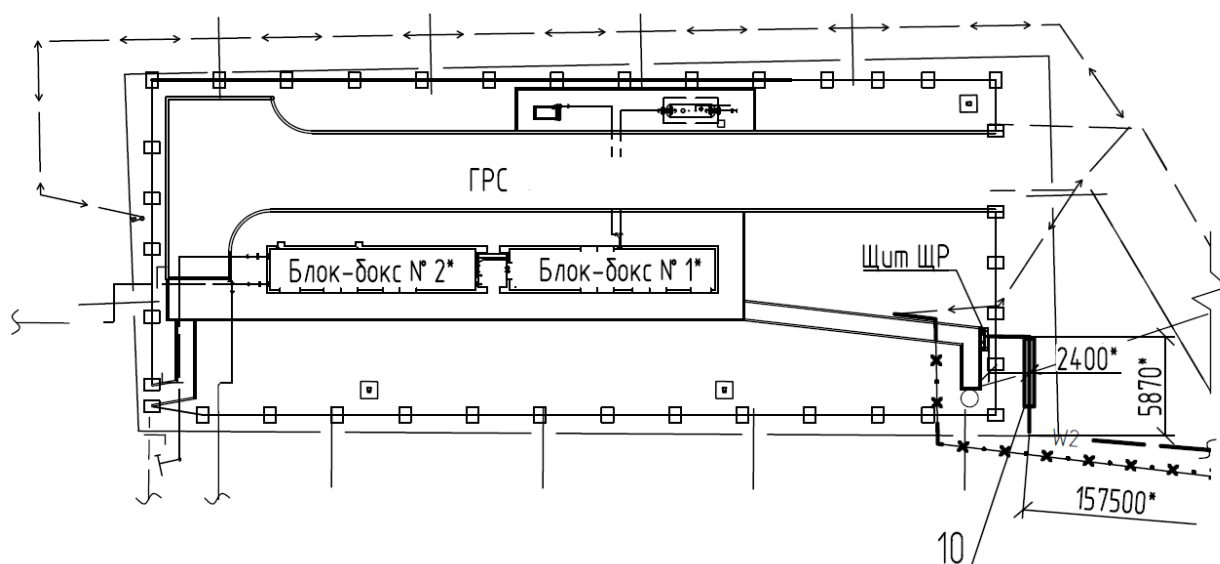


Рисунок 1 – Генеральний план газорозподільної станції [2]

На території газорозподільної станції розміщені будівлі контейнерного типу, що укомплектовані технологічним обладнанням. Зовнішній вигляд будівель газорозподільної станції наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд будівель газорозподільної станції [2]

Технологічне устаткування комплектних контейнерів є специфічним та сертифікованим згідно чинних вітчизняних та міжнародних нормативних документів та стандартів [2].

Перший контейнер містить [2]:

- систему перемикання;
- вимірювальну систему;
- систему одоризації газу.

Другий контейнер містить [2]:

- систему очищення-фільтрації газу;
- систему підігріву газу;
- систему редукції;
- систему газопостачання котельні;
- газову котельню для власних потреб;
- установку управління та контрольно-вимірювальних приладів.

Сумарне споживання газорозподільної станції в залежності від пори року зведено в табл. 1.

Добовий графік електричного навантаження газорозподільної станції наведено на рис. 3.

Таблиця 1

Сумарне споживання в залежності від пори року [2]

№	Споживач	Потужність, Вт
1	Система оповіщення загазованості	40
2	Система передачі даних	200
3	Система освітлення з датчиками	1700
4	Підігрів регуляторів, в холодну пору року	2000 – 2500
5	Катодний захист від корозії	800
	Сумарна потужність в холодну пору року	5240
	Сумарна потужність в теплу пору	2740

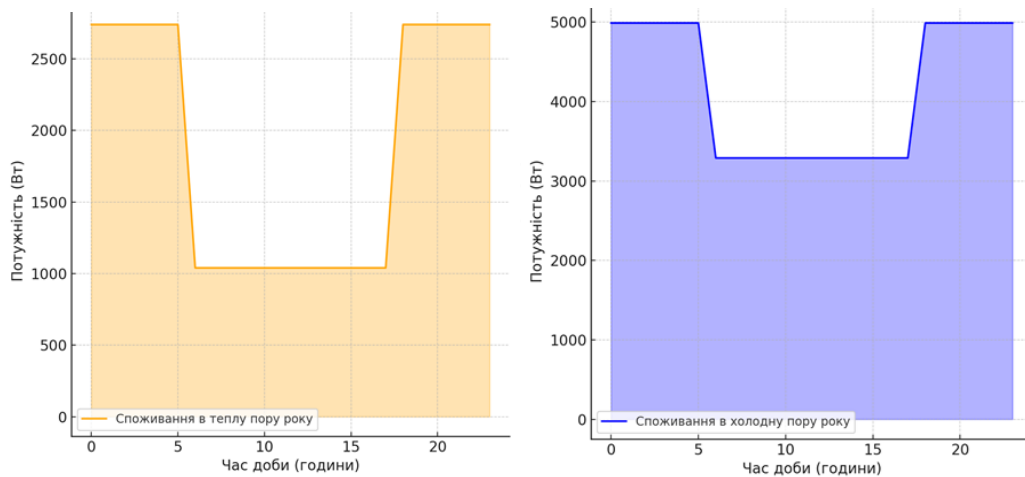


Рисунок 3 – Добовий графік електричного навантаження газорозподільної станції

В існуючій структурній схемі електроживлення газорозподільної станції на випадок аварійної перерви в електропостачанні передбачено автоматичне включення резерву з перемиканням живлення на генератор газовий типу GENERAC 7232 потужністю 10 кВА [3].

З огляду на те в яких умовах працює газогенератор – це не безперервний процес, тобто, жоден генератор, навіть найкращий, не працює 24/7, їх теж потрібно обслуговувати, тому з огляду на зазначене, було прийнято рішення про розробку додаткової системи резервного живлення газорозподільної станції на основі фотоелектричних перетворювачів.

В роботі обрано складові системи резервного електропостачання:

- фотоелектричні модулі Longi Slar LR5-72HTH-565M-565 Wp (20 шт.) [4];
- кріплення для монтажу фотоелектричних модулів (20 шт.);
- акумуляторні батареї Exeln LiFeP4 48V 50Ah (5 шт.) [5];
- інвертор гібридний Victron Energy Quattr 48/8000/110-100/100 [6];
- газовий генератор Generac 7232 [3].

Діаграма балансу потужності системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для газорозподільної станції наведена на рис. 4.

Розрахунок продуктивності фотоелектричної станції за середньорічним значенням показав, що протягом року виникає як надлишок, так і дефіцит енергії в залежності від пори року.

Якщо енергії, що генерується фотоелектричною системою, буде недостатньо, енергія буде споживатися від газогенераторної установки. Коли ж вироблення буде більшим за споживання, електроенергія може передаватись на заряд акумуляторів.

Проведено розрахунок економічних показників системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів газорозподільної станції.

Згідно розрахунків, економічний ефект від встановлення власної енергонезалежної генерації від зовнішніх впливів та з урахуванням на те що станція ГРС повністю стає автономною, є позитивним.

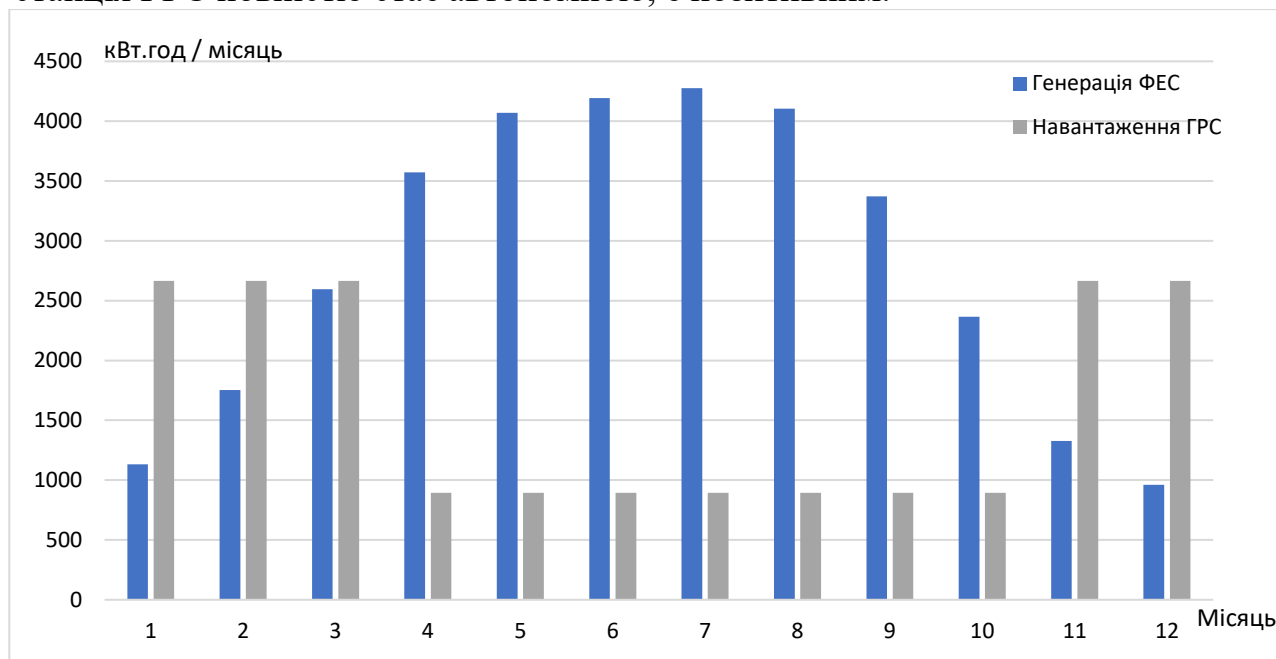


Рисунок 4 – Діаграма балансу потужності системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для газорозподільної станції

Отже, комплексне використання відновлюваних джерел енергії, а також в якості резервного джерела – газогенераторної установки, дозволить повністю забезпечити електричною енергією газорозподільчу станцію.

Список літератури:

1. Бондаренко, М.Ю. Резервне живлення із застосуванням фотоелектричних перетворювачів / М.Ю. Бондаренко // Науковий журнал «Енергетика України». – 2021. – № 3. – С. 65–78.
2. Оператор ГТС України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tsoua.com/> (дата звернення: 14.04.2025). – Назва з екрана.
3. GENERAC [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://generac.in.ua/?gad_surce=1&gclid=EAIaIQbChMInL6sl9sigMVTgWiAx39MhvBEAAYASAAEgIU3fD_BwE (дата звернення: 14.04.2025). – Назва з екрана.
4. Longi Solar 565W Hi-MO 6m Silver Frame, LR5-72HTH-565M в SOLAR MARKETS [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://solar-markets.com.ua/soniachna-panel-longi-solar-565w-hi-mo-6m-silver-frame-lr5-72hth-565m/> (дата звернення: 14.04.2025). – Назва з екрана.
5. AX-LFP-50_51.2 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://sun-energy.com.ua/image/pdf/AX-LFP-50_51.2_ukr-min.pdf (дата звернення: 14.04.2025). – Назва з екрана.
6. Інвертор гібридний Victron Energy Quattro 48/8000/110-100/100 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://vencn.ua/ua/prducts/victrn-energy-quattr-488000110-100100> (дата звернення: 14.04.2025). – Назва з екрана.

УДК 621.311.245

ПРО ЛІТАЮЧІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Д.т.н., професор Воїнов О.П., Зініч І.О., Коренкова М.О., Качула І.В.
*Херсонський навчально-науковий інститут національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*
voionova_s@yahoo.com

Науковий керівник: д.т.н., проф. Воїнов О.П.

Постійно зростаючі ціни на традиційні вуглецеві викопні енергоносії, обмежений їх запас, нерівномірність їх розподілу, викиди в зовнішнє середовище екологічно небезпечних речовин при їх згорянні спричиняють зростання інтересу до нетрадиційних джерел енергії, які покликані замінити природні енергетичні вуглецеві копалини, що активно використовуються людством.

Одним з таких нетрадиційних джерел енергії є вітрогенератор для перетворення енергії вітру на механічну енергію ротора, а потім - на електрику.

При цьому, як правило, від 30 до 50% вартості будь-якого вітрогенератора посідають витрати, пов'язані з будівництвом вежі для нього.

Але основна проблема даних генераторів полягає в тому, що вітер біля земної поверхні постійно змінює свою силу та напрямок. Через це подібні генератори не можуть досягти стабільного вироблення електрики, і їхня потужність постійно коливається.

Для зменшення цього недоліку генератори встановлюють на великих відкритих просторах, наприклад, недалеко від берега, прямо в морі, або генератор піднімають на максимально допустимому сучасними технологіями висоту.

Для цього будують генераторні вежі, які, як правило, влаштовані за принципом стебел рослин: розширюються донизу і звужуються догори. Ці конструкції дозволяють встановлювати генератори досить високо над земною поверхнею і є досить міцними, щоб витримувати як вагу самого генератора, так і тиск вітру. Висота веж сучасних вітрогенераторних установок може досягати 180 м і навіть 200 м.

Однак, незважаючи на всі хитрощі, все одно швидкість вітру в приземному шарі є плаваючою величиною, тому вчені шукають різноманітні підходи для стабілізації віддачі від існуючих генераторів.

Дуже перспективним у цьому напрямі є одержання енергії вітру з висот понад 200 метрів.

Відомо, що швидкість вітру на висотах 400-500 м досягає 16-17 м/с влітку, що відповідає шторму за шкалою Бофорта; взимку ж, швидкість вітру посилюється до 18-19 м/с, що, за тією ж шкалою Бофорта, відповідає сильному шторму [1].

Згідно з дослідженнями компанії KiteGen, Землю оточують дві смуги вітрового потоку [2]. Одна знаходиться у південній півкулі, на широті

Патагонії, а інша – у північній півкулі, над Європою. Висота потоку коливається від 800 м до 10 000 м, а ширина - від 4000 км до 5000 км. Вітри на цій висоті є досить стабільними і дмуть постійно з середньою потужністю близько 2 кВт/м².

Саме тому компанія Makani вирішила виробляти електрику за допомогою використання повітряних зміїв і в грудні 2016 р. вперше запустила екземпляр потужністю 600 кВт із розмахом крила 28 м [3].

Для того, щоб досягти мети отримання дешевої відновлюваної енергії, кайт-енергетична система використовує автономні крила, що літають по круговій траєкторії і генерують електрику за допомогою вітрових турбін, встановлених на основну частину крила (рис. 1). Makani Airborne Wind Turbine - висотна вітроустановка, яка являє собою прив'язне крило і може літати на висоті між 250 і 600 м. На ній встановлені вітроприймальні пристрої типу маленьких парових турбогенераторів сумарною потужністю 600 кВт [1].



Рисунок 1 – Бортова вітрова турбіна висотної вітроустановки Makani

Італійськими дослідниками був створений стартап під назвою KiteGen, в якому застосовують енергію вітру, яку використовують кайтсерфери, для генерації електрики. У результаті було створено систему, що складається з генератора, встановленого на землі, та виносної штанги, до якої прикріплений повітряний змій (рис. 2). Його рух у повітрі дозволяє обертати штангу, приводячи в дію генератор, з яким вона з'єднана [4].



Рисунок 2 – Гігантське силове крило – повітряний змій KiteGen

За розрахунками цієї компанії, система, що складається з 20 повітряних зміїв, керованих централізовано за допомогою комп'ютера, можуть генерувати близько 1 ГВт електрики, що дорівнює середній електростанції атомного типу.

Компанія Altaeros розглядає можливість отримання електрики за допомогою аеростатів трубчастого типу, що постійно перебувають на висоті від 300 м і вище [5]. Першим зразком компанії був надувний аеростат із укріпленою в центрі нього крильчаткою генератора (рис. 3).



Рисунок 3 – Надувний аеростат трубчастого типу з крильчаткою генератора

Роботи компанії в цьому напрямку призвели до створення нового аеростату підвищеної потужності, який призначений для польотів на висоті 300 м, і повинен виробляти до 30 кВт електрики.

Команда дослідників із Шотландії освоює повітряні простори за допомогою повітряних зміїв, які у кайтсерферів називаються «парафойли» і тримають свою форму за рахунок потоку набігаючого повітря, який надуває осередки, з яких складається змій [6]. На землі знаходиться спеціально обладнана вантажівка, яка несе у своєму кузові генератор електрики, до якого прикріплений за допомогою троса повітряний змій, що летить на висоті 450 м. Змій описує на цій висоті траєкторію у формі вісімки. Стандартний типовий змій, в рамках цього проекту, має ширину близько 40 м, що дозволяє йому виробляти до 3 МВт електрики.

Звичайно, для широкого використання цієї технології доведеться вирішити низку проблем, таких як безпека експлуатації висотних вітроагрегатів та передача/акумуляція енергії.

Список літератури:

1. Все выше и выше: перспективы высотной ветроэнергетики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.technocrats.com.ua/vse-vyshe-vyshe-perspektivy-vysotnoj-vetroenergetiki.html>. – Назва з екрана.
2. High-altitude wind [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/KiteGen>. – Назва з екрана.
3. Makani History [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Makani_\(company\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Makani_(company)). – Назва з екрана.
4. KiteGen Research [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kitegen.com/en/>. – Назва з екрана.
5. Floating wind turbines bring electricity where it's needed [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nsf.gov/news/floating-wind-turbines-bring-electricity-where-its>. – Назва з екрана.
6. Parafoil Kite [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.amttrade.co.uk/parafoil-kite>. – Назва з екрана.

УДК 621.383.51

ПОРІВНЯННЯ ВИРОБЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ ФАСАДНИМИ ТА ДАХОВИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

К.т.н., доц. Курак В.В., Лісова В.В., Тендітний Д.О.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
vk_74@ukr.net

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

В умовах міської багатоповерхової забудови, коли площа фасаду будівлі значно перевищує площу її даху, енергетично вигідним може стати підхід до збільшення генерації електричної енергії фотоелектричними станціями при залученні поверхонь фасадів будівель [1]. Однак, на даний час в Україні реалізовано лише поодинокі приклади фасадних фотоелектричних систем і перевага все ще надається класичним станціям з даховим похилим розташуванням модулів, які забезпечують більш сприятливі умови щодо сонячної інсоляції, ніж фасадні.

В даній роботі представлено результати з оцінки вироблення енергії фасадними фотоелектричними станціями у порівнянні з даховими сонячними системами на прикладі умов сонячної інсоляції, характерних для Херсонської області.

Розрахунок надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні фасаду виконувався за методикою [2], що враховує потоки прямого, розсіяного та відбитого від підстилаючої поверхні сонячного випромінювання. В якості вхідних використовувались кліматичні дані щодо надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню, характерні для Херсонської області [3]. Розрахунок проводився для середньостатистичного дня кожного місяця для вертикальних поверхонь з південною та східною (західною) просторовими орієнтаціями, а також для похилої поверхні з південним азимутом і кутом нахилу 35° до горизонту.

Для кожної приймальної поверхні із зазначеною просторовою орієнтацією проведено оцінку питомого вироблення електричної енергії за методикою [4]. Приймалося, що всі фотоелектричні системи комплектуються однаковими спеціалізованими модулями, призначеними для інтеграції в конструкцію будівлі, номінальною потужністю 180 Вт та мережевим інвертором з типовою ефективністю перетворення постійного струму у змінний на рівні не нижче 98%.

Встановлено, що за умов розміщення модулів на південному фасаді станція здатна забезпечити річне вироблення електричної енергії загальним обсягом близько $108 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$, в той час як у випадку розміщення модулів на східному або західному фасадах – близько $84 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$, що лише на 22% менше у порівнянні з південним (табл. 1). Це свідчить про доцільність розміщення фотоелектричних модулів не лише на південних, але й на східних та західних фасадах будівель.

Таблиця 1

Питоме вироблення енергії фотоелектричними системами, кВт·год/м²

Система	Місяць												Рік
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Фасадна (південь)	7,08	8,82	9,89	10,52	10,30	7,97	8,61	9,60	11,64	10,62	6,56	6,19	107,8
Фасадна (схід, захід)	3,04	4,77	6,33	9,17	11,66	9,80	10,35	9,23	8,65	5,67	2,78	2,44	83,9
Дахова (південь, $\beta = 35^\circ$)	7,22	9,87	13,02	16,62	18,78	15,24	16,24	16,06	16,14	12,49	6,99	6,28	154,9

Як показує аналіз даних табл. 1, питоме вироблення енергії для дахової станції, що має орієнтовані на південь модулі, нахилені під кутом 35° до горизонту і, відповідно, кращі умови сонячної інсоляції протягом року, ніж для фасадних, становить 155 кВт·год/м² за рік. Цей показник приблизно в 1,4 рази вищий у порівнянні з питомим виробленням фасадної станції з модулями, орієнтованими на південь, та в 1,8 разів перевищує вироблення енергії для модулів, розміщених на східному або західному фасаді. Втім, враховуючи, що в багатоповерхових будинках площа фасаду є суттєво більшою за площу даху, внесок фасадних модулів у загальну генерацію фотоелектричної системи може бути значно більшим за той, що забезпечується модулями, розташованими на даху будівлі.

На рис. 1 представлено долю вироблення енергії фасадною фотоелектричною системою відносно дахової в залежності від співвідношення площ геліополів фасадної і дахової станцій.

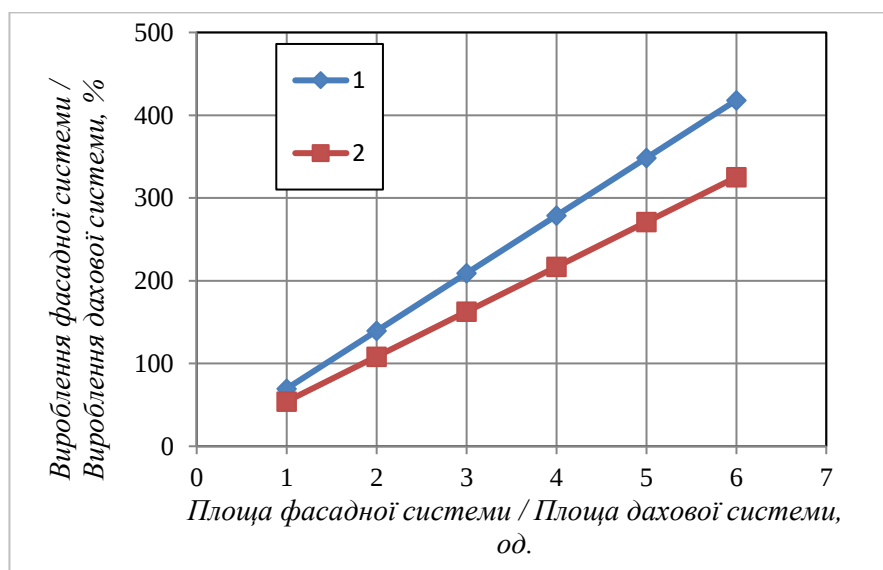


Рисунок 1 – Доля виробленої енергії фасадною системою відносно дахової при різних співвідношеннях площ фасадної до дахової станцій:

1 – південний фасад; 2 – східний (західний) фасад

З аналізу рис. 1 слідує, що річне вироблення енергії фотоелектричною системою з модулями, розташованими на південному фасаді будівлі, починає перевищувати аналогічний показник для дахової станції, якщо площа фасадної системи є більшою за дахову приблизно у 1,5 рази, а для модулів, розташованих на східному або західному фасаді – в 1,9 рази. Таке співвідношення між площами відповідних фасадів та даху легко реалізується в більшості проектів багатоповерхових будівель.

Отже, незважаючи на кращі енергетичні показники дахових сонячних електростанцій, фасадні фотоелектричні системи потенційно здатні забезпечити суттєвий внесок у генерацію електричної енергії у випадку їх інтеграції в конструкції багатоповерхових будівель, зокрема тих, що розташовані в кліматичних умовах Херсонщини. Такі фасадні системи варто передбачати на стадії проектування нових та капітального відновлення пошкоджених внаслідок бойових дій будівель під час повоєнного відновлення населених пунктів, зокрема, й міст, розташованих на території Херсонщини, що значно постраждала від цілеспрямованих руйнувань, заподіяних агресором.

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. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – Hoboken: John Wiley&Sons, Inc., 2013. – 910 p.
3. POWER. Data Access Viewer [Electronic resource]. – Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 24.04.2024). – Title from the screen.
4. Основи сонячної електроенергетики. Навчальний посібник для студентів спеціальності 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка: навч. посіб. / В.В. Курак, О.В. Андропова, Н.Л. Дон. – Херсон: Книжкове вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2024. – 348 с.

УДК 621.431.36

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ НЕЗАЛЕЖНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВ ТА ТРАНСПОРТУ

Кострубов Д.В., Коновалов Р.А.

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», м. Харків

n.p.kundenko@ukr.net

Науковий керівник: д.т.н., проф. Кунденко М.П.

Наукові дослідження спрямовані на вирішення завдання підвищення енергетичної незалежності та екологічної безпеки підприємств та транспорту. Для вирішення цих питань пропонується використання біогазу в якості джерела енергії для складних високотемпературних теплотехнологічних комплексів різних галузей промисловості, що дозволить скоротити споживання природного газу за умов збереження техніко-економічних показників роботи обладнання та сприяє вирішенню важливої екологічної проблеми забруднення шкідливими відходами значних територій та повітряного басейну, підвищення екологічного рівня залізничного транспорту завдяки зменшенню шкідливих викидів у повітря, а також забруднення навколишнього середовища паливо-мастильними матеріалами. Використання таких комплексів на транспорті значно зменшує потребу в використанні важких вуглеводнів для потреб залізничного транспорту. Основні труднощі при використанні різних видів біопалива виникають через розходження хімічного складу викопних палив та біопалива. В багатьох випадках застосування біогазу призводить до необхідності реконструкції або заміни теплотехнологічного та енергетичного обладнання підприємств [1]. Також є попередні дослідження в напрямі застосування біогазу в системі тяги залізничного транспорту з використанням паливних елементів, електричних накопичувачів енергії та високоефективних тягових приводів рухомого складу, а також розміщення обладнання на рухомому складі залізниць [2].

У зв'язку з цим виникає необхідність подальших досліджень в цьому напрямку, а саме проведенні моделювання роботи систем утилізації теплоти високотемпературних теплотехнологічних комплексів та процесів перетворення та накопичення енергії в рухомому складі залізниць з метою визначення теплових характеристик повітря горіння для недопущення зміни режимних та технологічних параметрів роботи обладнання, параметрів паливних елементів, накопичувачів енергії та особливостей характеристик тягового електроприводу. Нами розроблені математичні моделі, що дозволяють моделювати роботу теплообмінних апаратів високотемпературних теплотехнологічних комплексів, тягових електроприводів рухомого складу залізниць з накопичувачами енергії та паливними елементами. Для отримання запланованих результатів необхідно провести удосконалення математичної моделі з урахуванням умов додавання біогазу в установку або використання біогазу в якості палива для паливних

елементів рухомого складу.

Сьогодні біогаз в різних країнах світу використовується за трьома основними напрямками – для отримання теплової енергії, виробництва електроенергії та на транспорті.

У європейській країнах біогаз переважно використовується на генераторних установках невеликої потужності для отримання теплової та електричної енергії, 73 % всієї біомаси йде на потреби теплопостачання. Існують приклади застосування біогазу в високотемпературних промислових теплотехнологічних установках різних галузей промисловості. Успішне використання біогазу на цегельних заводах обмежується декількома прикладами на окремих підприємствах в Німеччині, у Сполучених Штатах Америки, Іспанії та Великобританії. Проводились дослідження щодо використання звалищного газу в обортових печах цементної промисловості, де біогаз спалювався сумісно з природним газом.

Для проведення досліджень застосування біогазу в різних галузях промисловості необхідно проведенні моделювання роботи системи утилізації високотемпературних теплотехнологічних комплексів та процесів перетворення енергії в системі тягового приводу з метою визначення параметрів повітря горіння, що подається в палинкові пристрої, параметрів паливних елементів, накопичувачів енергії, елементів тягового приводу та їх безпосереднього розміщення в рухомому складі.

В той же час дослідженням теплових процесів у регенераторах плавильних агрегатів приділялося недостатньо уваги. Для їхнього розрахунку використовувалися наближені методики, які зводилися до визначення загального об'єму насадки та розмірів камери теплообмінників без урахування технологічних зв'язків і реальних умов роботи основних агрегатів і регенераторів. Враховуючи зміну складу та об'ємів димових газів, пов'язаних з додаванням біогазу, наслідком цього може бути недостатньо глибока утилізація теплоти димових газів та погіршення ефективності роботи.

Тому виникає необхідність удосконалення методик розрахунку теплообмінного обладнання систем регенерації теплоти за умов застосування біогазу. При застосування біогазу для живлення паливних елементів на рухомому складі необхідно додатково визначити можливості розташування елементів обладнання на рухомому складі, які забезпечують безперервне зчеплення локомотиву та тягових режимів роботи при різних рівнях загрузки біомаси.

Список літератури:

1. Мірошніченко Н.В. Дослідження енергоекологічного методу переробки промислово-побутових відходів / Н.В. Мірошніченко, О.Р. Белянська, К.С. Красніков, К.П. Шумило // Актуальні наукові дослідження у сучасному світі. – 2019. – № 8 – С. 70-75.
2. Голуб Г. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / Г. Голуб, В. Войтенко, Б. Рубан, В. Єрмоленко // Техніка і технології АПК. – 2012. – № 2(29). – С. 18-21.

УДК 620.92

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОВОЛЬТАІЧНОЇ СТАНЦІЇ З КОНЦЕНТРУВАННЯМ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Яценко Ф.О., 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.

Визначення технічних показників сонячних електростанцій з метою обґрунтування майбутніх проектів у відновлюваній енергетиці має свою специфіку, що унеможливорює використання у повному обсязі відомих методів, які використовуються в традиційній енергетиці. Ця специфіка є наслідком особливостей сонячного випромінювання, як енергоресурсу, а також специфіки процесу перетворення сонячної енергії в електроенергію. Для інвестиційних проектів у цій галузі необхідні нові, максимально обґрунтовані підходи до оцінки доцільності і ефективності цих проектів. Важливим етапом на цьому шляху є математичне і комп'ютерне моделювання сонячних енергетичних систем.

Концентраторна фотоелектрична енергетика (HCPV – high concentration photovoltaic) – це технологія, яка використовує оптичні елементи для концентрації сонячного світла на сонячних елементах. Концентруючи сонячне світло, системи HCPV можуть досягти вищої ефективності порівняно з традиційними фотоелектричними системами. Ця технологія є передовою формою виробництва сонячної енергії та привертає увагу в промисловості завдяки своєму потенціалу значного збільшення виробництва енергії [1].

Системи HCPV використовують лінзи або дзеркала, щоб сфокусувати велику кількість сонячного світла на невеликій площі вискоефективних сонячних елементів. Ці елементи відстежують рух сонця протягом дня, щоб максимально збільшити кількість сонячного світла. Потім концентроване сонячне світло перетворюється на електрику за допомогою вискоефективних сонячних батарей, які виготовляються з таких матеріалів, як арсенід галію.

Системи, що використовують фотоелектричні елементи високої концентрації, мають найвищу ефективність серед усіх існуючих фотоелектричних технологій, досягаючи близько 40% для модулів і 30% для систем. Сукупна встановлена потужність концентраторних фотоелектричних установок досягла 350 МВт, що становить менше 0,2% від глобальної встановленої потужності [1, 2].

Оскільки попит на чисті та стійкі джерела енергії продовжує зростати, очікується, що системи HCPV відіграватимуть вирішальну роль у глобальному переході до відновлюваної енергії.

Тому метою роботи є розробка імітаційної комп'ютерної моделі фотovoltaїчної станції з концентруванням сонячного випромінювання та

дослідження її роботи на основі порівняльного аналізу модельних результатів з реальними даними діючих HCPV-станцій.

У якості модельного середовища було обрано програму System Advisor Model (SAM) – це техніко-економічна комп'ютерна модель, призначена для полегшення прийняття рішень для людей, які працюють у галузі відновлюваної енергетики. SAM моделює модуль HCPV за допомогою кривої ефективності комірки та набору коефіцієнтів втрат, які ви вказуєте на сторінці модуля. Крива ефективності багатоперехідної комірки є лінійною інтерполяцією таблиці ефективності перетворення потужності як функції падаючого опромінення. Модель використовує поліном модифікатора повітряної маси для наближення спектральних впливів на продуктивність модуля. Можна вказати коефіцієнти втрат для врахування оптичної лінзи, помилки вирівнювання, помилки трекара, тріпотіння вітру та інших втрат, пов'язаних із HCPV. Система HCPV використовує модель інвертора SAM Sandia [3].

В якості об'єкту дослідження було обрано сонячну електростанцію Alamosa Solar Generating Plant – це концентраторна фотоелектрична електростанція потужністю 35,3 МВт, це третя у світі за величиною діюча HCPV електростанція. Вибір цього об'єкту обумовлений декількома причинами: 1) для даного об'єкту є дані щодо вироблення енергії за декілька років, які представлено в табл. 1; 2) станція розташована у США, де база даних погоди представлена дуже детально за різні роки [2].

Таблиця 1

Помісячна та річна генерована потужність (МВт·год) на станції Alamosa Solar Generating Plant за даними оператора [2]

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2012				5,528	6,899	7,639	6,521	5,464	5,946	6,850	5,385	3,887	54,119
2013	4,934	4,933	5,051	4,535	6,004	6,422	5,675	6,043	5,851	6,593	4,787	4,764	65,592
2014	4,584	5,143	5,937	4,989	5,690	6,390	5,133	5,899	5,766	5,770	4,851	3,502	63,654
2015	3,358	4,544	6,159	5,504	4,858	6,054	4,187	5,561	5,488	4,404	5,019	3,719	58,855
2016	4,229	5,010	5,309	4,702	5,964	6,523	7,128	4,913	5,543	5,814	4,924	3,789	63,848
2017	2,380	3,707	5,187	5,726	6,750	7,315	6,345	5,310	4,448	5,267	3,360	3,450	59,245
2018	3,068	3,608	4,666	5,655	6,517	7,003	6,104	6,094	5,857	4,368	3,600	2,607	59,148
2019	2,852	3,005	4,476	5,270	5,610	6,310	5,973	6,080	5,019	4,934	3,066	2,235	54,831
2020	2,969	3,128	4,792	5,355	6,219	6,029	6,248	5,093	4,963	3,740	3,222	2,435	54,193
Average Annual Production (years 2013-2020) :													59,921

Об'єкт складається з 504 двовісних систем відстеження сонячної енергії Amonix 7700 та мережевих інверторів Solectria потужністю 70 кВт. Кожна система підтримує сім «мегамодулів» HCPV, кожен з яких виробляє близько 10 кВт. Кожен модуль містить 1080 лінз Френеля для концентрації сонячного світла в 500 разів на багатоперехідних сонячних елементах. Станція

розташована на площі 225 акрів на висоті 7500 футів у сонячній і прохолодній долині Сан-Луїс разом із кількома іншими сонячними електростанціями [2].

Графічне співставлення виміряних та розрахованих значень генерованої потужності наведено на рис. 1,2.

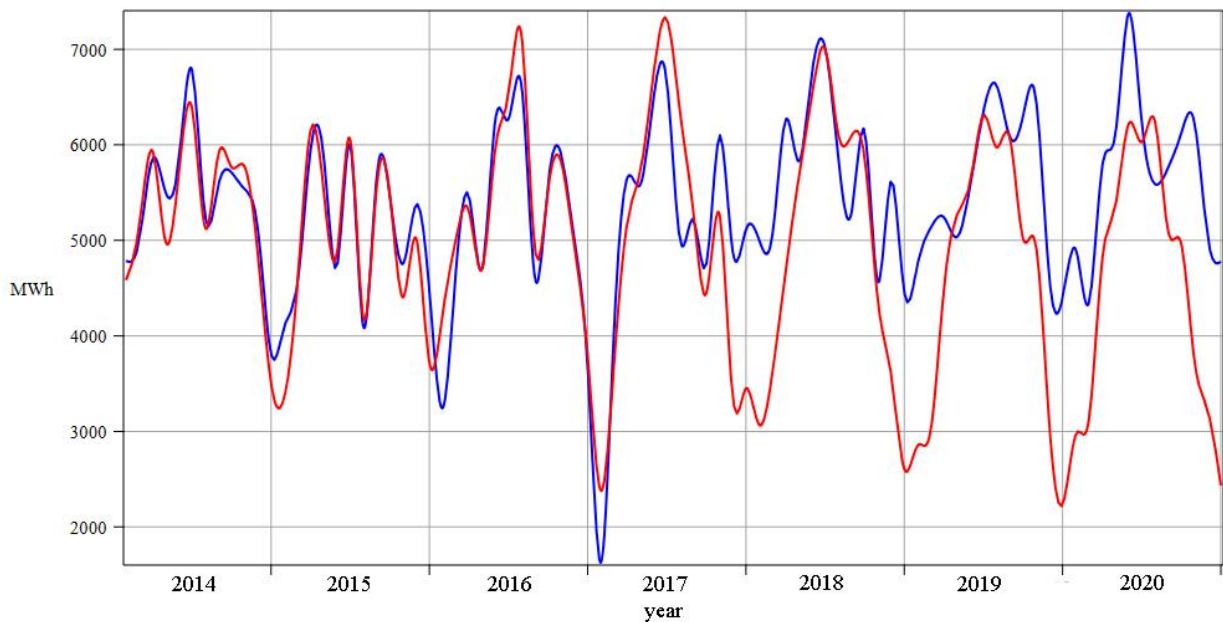


Рисунок 1 – Вироблення потужності на Alamosa Solar Generating Plant по місяцях за період 2014-2020 рік: червона лінія – виміряні значення, синя лінія – розраховані значення



Рисунок 2 – Річна вироблена потужність на Alamosa Solar Generating Plant за період 2014-2020 рік

Аналіз результатів співставлення виміряних та розрахованих значень генерованої потужності на Alamosa Solar Generating Plant по місяцях за період 2014-2020 рік показав, що перші чотири роки (2014-2017) майже ідеально

співпадають. Для 2018-2020 років спостерігаються відмінності: розраховані значення генерованої потужності перевищують виміряні значення при збереженні профілю кривої (рис.1). Тенденція до зростання розбіжностей між виміряними та розрахованими даними демонструє рис. 3.

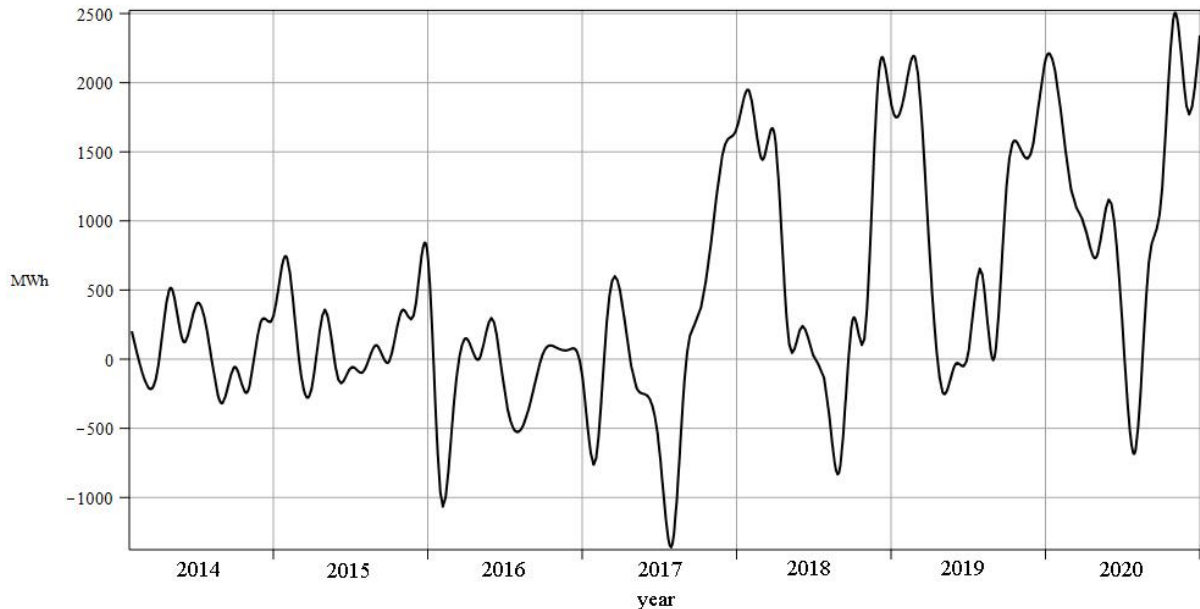


Рисунок 3 – Різниця між розрахованою та виробленою потужністю на Alamosa Solar Generating Plant по місяцях за період 2014-2020 рік

Результати обчислень за допомогою SAM є відносно точними. Однак основною проблемою є не проста напівемпірична модель, а опис ресурсів, який різко недооцінює сезонні відмінності. Хоча перед використанням програмного забезпечення SAM для обчислень необхідне подальше налаштування напівемпіричної моделі продуктивності нових фотоелектричних установок, наявність точних даних для перевірки є обов'язковою. Як це трапляється з ресурсом вітру, який у файлах погоди, що підтримують SAM, переоцінений, це також трапляється з ресурсом сонячної енергії. У цьому випадку різко недооцінюється сезонна мінливість.

Список літератури:

1. Concentrator photovoltaics. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrator_photovoltaics (дата звернення: 12.04.2025). – Назва з екрану.
2. Alamosa Solar Generating Project. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Alamosa_Solar_Generating_Project#:text=The%20Alamosa%20Solar%20Generating%20Plant,third%20largest%20operating%20CPV%20facility. (дата звернення: 12.04.2025). – Назва з екрану.
3. System Advisor Model (SAM). [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sam.nrel.gov> (дата звернення: 12.04.2025). – Назва з екрану.

УДК 697.133

РОЗРОБКА УНІФІКОВАНОЇ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ ПОБІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ В ЯКОСТІ ПАЛИВА

К.т.н., доц. Петрик О.А., к.т.н., доц. Назаренко І.А., аспірант Жуков Р.О.
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя
Iternel17@ukr.net

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

На теперішній час існує багато різних типів котлів та джерел палива. У кожній роботі вони розглядаються окремо з використанням різних уніфікованих методик, що не дозволяє виконати оцінку та аналіз між ними. У роботі розроблено уніфіковану методику оцінки теплової ефективності, яка дозволяє знайти теплову ефективність енергетичних установок для різних видів палива. Виконано аналіз стану альтернативних видів палива в енергетиці України та інших держав світу. Питання застосування альтернативних палив при виробництві енергії є стратегічними й успішно вирішуються багатьма країнами у світі, оскільки дозволяє розширити енергетичну базу, знизити залежність від стану природних ресурсів (у тому числі природного газу) і коливань цін на них, зменшити забруднення навколишнього середовища. Проблема пріоритетності того або іншого альтернативного палива в якості найбільш привабливого є актуальною і ще довгий час буде залишатися дискусійною. При цьому, необхідно розуміти який з видів енергетичних відновлюваних джерел є більш перспективним з позиції енергоефективності. В даній роботі виконано адаптацію різних методик визначення енергетичного потенціалу використання побічної продукції в якості палива для визначення енергоефективності та доцільності її використання у якості джерела енергії. Наведена методологія має достатню простоту для її виконання та дозволяє визначити енергоефективності альтернативних видів палива за умови актуальних цінових пропозицій.

Для того, щоб оцінити – яке паливо є більш ефективним та менше витратним у відповідності до сьогодення за допомогою цієї методики визначається енергетичний потенціал використання побічної продукції в якості палива для визначення енергоефективності та доцільності її використання у якості джерела енергії. В основі розрахунків лежать методології [1-3].

Зольність у перерахунку на робочу масу палива, %:

$$A^p = A^c \frac{100 - W_p}{100}. \quad (1)$$

Вміст вуглекислоти карбонатів у перерахунку на робочу масу палива, %:

$$(CO_2)_k^p = (CO_2)_k^c \frac{100 - W_p}{100}. \quad (2)$$

Виправлена зольність робочої маси палива, %:

$$A_{\text{випр}}^p = A^p 2 \frac{100 - W_p}{100}. \quad (3)$$

Коефіцієнт перерахунку складу палива з горючої маси на робочу:

$$K = \frac{100 - (A_{\text{випр}}^p + W^p + (CO_2)_\kappa^p)}{100}. \quad (4)$$

Елементарний склад спалимої частини робочого палива, %: вуглець $C^p = kC^z$; водень $H^p = kH^z$; сірка $S_{\text{ор+к}}^p = kS_{\text{ор+к}}^z$; азот $N^p = kN^z$; кисень $O^p = kO^z$.

Вища теплота згоряння горючої маси палива, МДж/кг:

$$Q_g^z = Q_g^z - 0,094S_{\text{ор+к}}^z - 0,015Q_g^z. \quad (5)$$

Нижча теплота згоряння горючої маси палива, МДж/кг:

$$Q_n^z = Q_g^z - 0,226H^z. \quad (6)$$

Нижча теплота згоряння робочого палива, МДж/кг:

$$Q_n^p = Q_n^z \frac{100 - (A_{\text{випр}}^p + W^p + (CO_2)_\kappa^p)}{100} - 0,025W^p = Q_n^z K - 0,025W^p. \quad (7)$$

Об'єм повітря, теоретично необхідного для повного згоряння палива, м³/кг:

$$V_0^g = 0,0889(C^p + 0,375S_{\text{ор+к}}^p) + 0,265H_p - 0,0333O^p. \quad (8)$$

Об'єм продуктів згоряння, що утворюються під час горіння палива з теоретичним об'ємом повітря, м³/кг:

а) трьохатомних газів

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01856(C^p + 0,375S_{\text{ор+к}}^p) + 0,509 \frac{(CO_2)_\kappa}{100} K_{CO_2}. \quad (9)$$

б) азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_0^g + 0,008N^p \quad (10)$$

в) водяної пари

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V_0^g, \quad (11)$$

Об'єм водяної пари в продуктах згоряння під час горіння палива з надлишком повітря, м³/кг:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{cp} - 1)V_0^g. \quad (12)$$

Об'єм продуктів згоряння при горінні палива з надлишком повітря, м³/кг:

$$V_r = V_{\text{RO}_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha_{cp} - 1)V_0^g. \quad (13)$$

Підрахунок виконується за середніми надлишками повітря в газоходах.

Об'ємні долі водяної пари і трьохатомних газів в продуктах згоряння:

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_z} \text{ та } r_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_z}. \quad (14)$$

Концентрація золи в продуктах згоряння, г/м³:

$$m_{\text{зл}} = \frac{10A^p a_{\text{зн}}}{V_z}. \quad (15)$$

Підрахунок ентальпій повітря та продуктів згоряння.

Ентальпії теоретичного об'єму повітря, що можливі у газоходах котельної установки, МДж/кг:

$$I_b^0 = V_0^g (c_9)_b 10^{-3}. \quad (16)$$

Ентальпії газоподібних продуктів згоряння палива при горінні з теоретичним об'ємом повітря, МДж/кг:

$$I_{\Gamma}^0 = (V_{\text{RO}_2} (c\vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}) 10^{-3}. \quad (17)$$

Ентальпії золи в продуктах згоряння, МДж/кг:

$$I_{\text{зл}} = a_{\text{ун}} \frac{A^p}{100} (c\vartheta)_{\text{зл}} 10^{-3}, \quad (18)$$

Ентальпії продуктів згоряння, що утворюються при горінні палива з надлишком повітря, МДж/кг:

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) I_{\text{в}}^0 + I_{\text{зл}}. \quad (19)$$

Наявне тепло одиниці маси робочого палива, МДж/кг:

$$Q_p^p = Q_{\text{н}}^p + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{мл}} + Q_{\text{в.внш}} - Q_{\text{к}}, \quad (20)$$

де $Q_{\text{мл}}$ – фізичне тепло палива; $Q_{\text{в.внш}}$ – фізичне тепло повітря; $Q_{\text{ф}}$ – фізичне тепло, що передається від дуття з форсунок; $Q_{\text{к}}$ – тепло, яке витрачається на розкладання карбонатів.

Втрати тепла від хімічної неповноти згоряння q_3 , %.

Втрати тепла від механічного недопалу q_4 , %. Мають місце тільки при спалюванні твердого палива.

$$q_4 = \left(a_{\text{шл}} \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} + a_{\text{ун}} \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right) \frac{32,7 A^p}{Q_p^p}, \quad (21)$$

де $a_{\text{шл}}$ и $a_{\text{ун}}$ – відповідно доля золи в шлаці і віднесенні; $\Gamma_{\text{шл}}$ и $\Gamma_{\text{ун}}$ – вміст горючих в шлаці і віднесенні, %; 32,7 – теплота згоряння коксових частинок в шлаці і віднесенні, МДж/кг.

Втрати тепла з відхідними газами, %:

$$q_2 = \frac{(I_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} I_{\text{xв}}^0)}{Q_p^p} (100 - q_4), \quad (22)$$

де I_{yx} , $I_{\text{xв}}^0$ – ентальпія димових газів та теоретично необхідного повітря, МДж/кг; α_{yx} – коефіцієнт надлишку повітря у відхідних газах.

Втрати тепла котельною установкою до навколишнього середовища, q_5 , %, приймається за [4].

Втрати тепла зі шлаком, що видаляється, %

$$Q_{\text{бшл}} = \frac{(1 - a_{\text{ун}}) A^p (c\vartheta)_{\text{шл}}}{Q_p^p}, \quad (23)$$

де $\vartheta_{\text{шл}}$ – температура шлаку, що видаляється, °C; $(c\vartheta)_{\text{шл}}$ – ентальпія шлаку при цій температурі, МДж/кг.

Якщо в котельній установці передбачається встановлення деталей, що охолоджуються проточною водою, то:

$$q_{\text{бохл}} = \frac{116,6 H_{\text{охл}}}{Q_{\text{к}}}, \quad (24)$$

де $Q_{\text{к}}$ – корисна потужність котла.

Сума втрат тепла, %

$$\Sigma q_{\text{ном}} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_{\text{бшл}} + q_{\text{бохл}}. \quad (25)$$

Коефіцієнт корисної дії котельної установки, %:

$$\eta_{\text{ку}} = 100 - \Sigma q_{\text{ном}}. \quad (26)$$

Тепло, яке використовується в котельній установці корисно, МВт:

$$Q_{\text{ку}} = D(h_{\text{нп}} - h_{\text{нв}}) + D_{\text{нр}}(h_{\text{кв}} - h_{\text{нв}}), \quad (27)$$

де D – паропроодуктивність котельної установки визначена завданням на проектування і дорівнює, кг/с; $h_{n.n.}$ – ентальпія перегрітої пари, кДж/кг; $h_{n.в.}$ – ентальпія поживної води, кДж/кг; $D_{пр}$ – витрата котлової води в продувку, кг/с; $h_{к.в.}$ – ентальпія котлової води при тиску в барабані, кДж/кг.

Знаходиться фактична витрата палива котельною установкою, кг/с:

$$B = \frac{Q_{ку}}{Q_p^p} \cdot \frac{100}{\eta_{ку}}. \quad (28)$$

Для порівняння кількісних характеристик спалюваного палива в різних топках, для обліку видобутку і вжитку палива ввели поняття умовного палива.

Під умовним паливом розуміється паливо з нижчою теплотворною здатністю робочої маси:

$$Q_n^p = 7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} = 29,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Теплова потужність N топкового пристрою зв'язана з витратою палива B і теплою згоряння Q_n^p співвідношенням, МВт

$$N = B Q_n^p. \quad (29)$$

Витрата умовного палива $B_{ут}$ зв'язана з витратою натурального палива B співвідношенням ($N_{ут} = N$), МДж/кг:

$$B_{ут} = \frac{B Q_n^p}{Q_{ут}} \quad \text{чи} \quad B_{ут} = \frac{B Q_n^p}{29,35}. \quad (30)$$

Паливний коефіцієнт:

$$Kn = \frac{Q_n^p}{7000}. \quad (31)$$

Питома витрата газу на вироблення ТЕ, м³/Гкал або кг/Гкал:

$$B_{ку} = \frac{1}{(Q_n^p \eta_{ку})}. \quad (32)$$

Питома витрата ум. палива на 1 Гкал виробленої ТЕ, кг ум.пал./Гкал:

$$B_{пум} = B_{ку} \cdot Kn. \quad (33)$$

Таким чином, за цією методикою оцінки теплової ефективності, яка дозволяє знайти теплову ефективність енергетичних установок для різних видів палива.

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. Luo C. The Effect Analysis of Thermal Efficiency and Optimal Design for Boiler System / C. Luo, K. Luo, Y. Wang, Z. Ma, Y. Gong //Energy Procedia. – 2017. – 105. – P. 3045-3050.
3. Vakkilainen E.K. Steam Generation from Biomass Construction and Design of Large Boilers. 1st Edition. Butterworth-Heinemann, 2016. – 160 p.
4. Febriani S.D.A. Analysis of Boiler Engine Efficiency Unit 2 PT. PJB UP Paiton / S.D.A. Febriani, M.R. Purwanto // Journal of Physics. – 2020. – 1805. – P.78-95.

УДК 621.383.51

ВДОСКОНАЛЕНА ТЕПЛОВА СХЕМА БЛОКУ SOLAR CELL

К.т.н., доц. Курак В.В., Комаров С.Ю., Грисевич Р.І.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький

vk_74@ukr.net

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

Моделювання складних механічних, електричних, теплових та інших систем останнім часом все частіше здійснюється з використанням спеціалізованого програмного середовища Matlab з пакетом Simulink [1]. Застосування цього програмного середовища дозволяє в наочний спосіб, користуючись наявними в бібліотеці Simulink або самостійно створеними блоками, будувати моделі різноманітних за складністю і фізичними принципами пристроїв і систем та проводити комплексний аналіз режимів їх роботи.

Основним блоком Matlab/Simulink, що застосовується для моделювання роботи фотоелектричного перетворювача, є блок Solar Cell (рис. 1). Математичний апарат блоку базується на рівнянні світлової вольт-амперної характеристики, записаному у відповідності до дводіодної еквівалентної схеми фотоелектричного перетворювача [2].

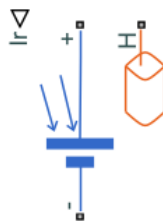


Рисунок 1 – Блок Solar Cell з тепловим портом

Густина потоку сонячного випромінювання подається на вхід I_g блоку Solar Cell (рис. 1) і лінійно впливає на фотострум перетворювача. В стандартному блоці передбачено також можливість врахування теплових процесів, що відбуваються в фотоелектричному перетворювачі, задіявши для цього тепловий порт H. Блочна схема цього порту представлена на рис. 2.

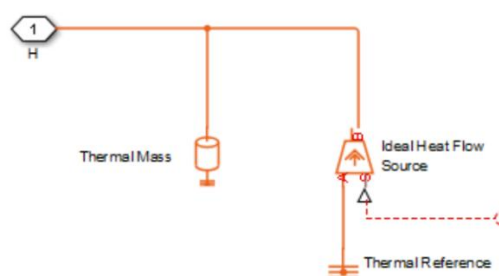


Рисунок 2 – Схема теплового порту стандартного блоку Solar Cell

Як слідує з рис. 2, у схемі теплового порту стандартного блоку Solar Cell враховано лише тепловий потік, що підводиться до термічної маси фотоелектричного перетворювача внаслідок генерування теплоти за рахунок електричних втрат на компонентах внутрішнього опору [2]. В той же час, потоки теплоти, пов'язані з неповнотою перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію, ігноруються і для їх врахування потрібно створювати власну теплову схему, що доповнювала б стандартну.

В даній роботі запропоновано вдосконалену теплову схему фотоелектричного перетворювача, що враховує не лише виділення теплоти внаслідок протікання електричного струму, а й нагрівання термічної маси через неповноту перетворення потоку сонячного випромінювання.

Нагрівання фотоелектричного перетворювача під дією не перетвореного сонячного випромінювання враховується шляхом підключення до теплового порту стандартного блоку Solar Cell окремої теплової схеми, що збільшує результуючий тепловий потік (рис. 3).

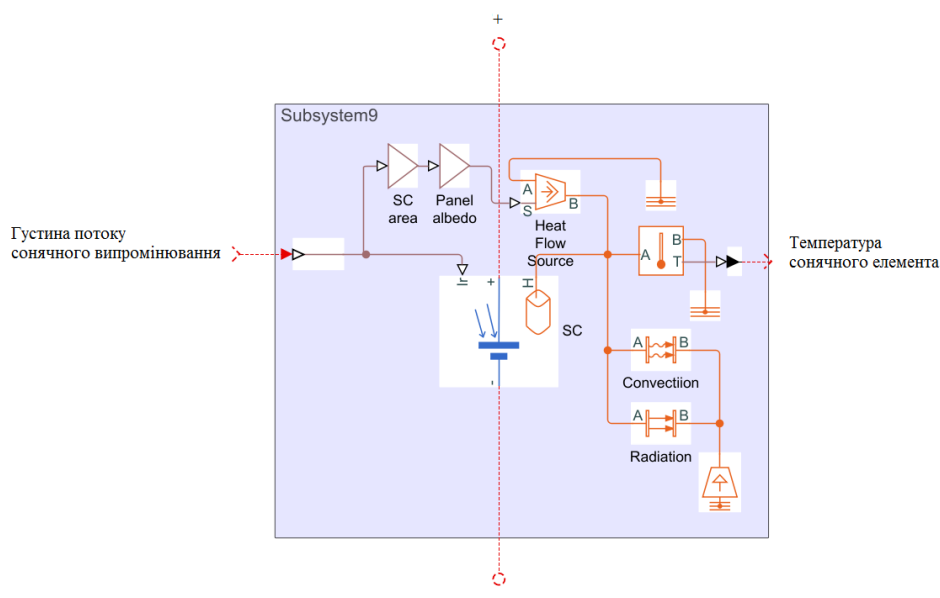


Рисунок 3 – Блок Solar Cell з вдосконаленою тепловою схемою

Як показано на рис. 3, стандартну теплову схему було доповнено блоками, що відповідають за надходження сонячної енергії до фотоелектричного перетворювача та відведення теплоти від нього до оточуючого середовища, а саме, такими блоками, як: Controlled Heat Flow Rate Source, Temperature Source, Convective Heat Transfer, Radiative Heat Transfer та Thermal Reference.

У вдосконаленій схемі блок Controlled Heat Flow Rate Source є ідеальним джерелом теплової енергії, яке може підтримувати контрольований тепловий потік незалежно від різниці температур, а інтенсивність цього потоку встановлюється фізичним сигнальним портом S.

Блок Temperature Source задає постійний рівень температури, що не залежить від теплового потоку в порту. В розробленій тепловій схемі таким незмінним температурним рівнем є температура оточуючого середовища.

Блок Thermal Reference є опорною точкою в тепловій схемі, в якій

температура приймається такою, що дорівнює абсолютному нулю.

Блок Convective Heat Transfer використовується для моделювання передачі теплоти від фотоелектричного перетворювача до оточуючого середовища конвекцією, а блок Radiative Heat Transfer – шляхом випромінювання. Інтенсивність конвективної тепловіддачі пропорційна різниці температур, коефіцієнту теплопередачі та площі поверхні фотоелектричного перетворювача, що контактує з оточуючим середовищем. Теплопередача випромінюванням моделюється у відповідності до закону Стефана-Больцмана і є пропорційною різниці температур тіл у четвертому степені, коефіцієнту випромінювання та площі поверхні фотоелектричного перетворювача.

Відбиття частини сонячного випромінювання від приймальної поверхні фотоелектричного перетворювача враховується введенням до схеми блоку множення Panel albedo, а площа цієї поверхні – блоком SC area. Поглинутий фотоелектричним перетворювачем потік сонячного випромінювання спрямовується на сигнальний порт блоку Controlled Heat Flow Rate Source.

Блок фотоелектричного перетворювача з вдосконаленою тепловою схемою передбачає наявність позитивного та негативного електричних виведень для включення в електричне коло, портів для підключення задатчика густини потоку сонячного випромінювання та контролю поточної температури сонячного елемента (рис. 3).

Перевірку розробленої теплової схеми здійснено шляхом моделювання роботи сонячного модуля LG290N1C [3] в умовах, що відповідають стандарту випробувань NOCT. Моделювання показало, що температура сонячного елемента у складі модуля становить 45,8 °C при паспортному значенні 45 ± 2 °C, що свідчить про коректність запропонованої теплової схеми фотоелектричного перетворювача та можливість її подальшого практичного використання.

Список літератури:

1. Simulink MathWorks [Electronic resource] / Math Works [Site]. – Access mode: https://www.mathworks.com/products/simulink.html?s_tid=hp_products_simulink/ (last access: 24.01.2025). – Title from the screen.
2. Help Center. Documentation. Solar Cell [Electronic resource] / Math Works [Site]. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/solarcell.html/> (last access: 25.01.25). – Title from the screen.
3. High Efficiency Mono X® NeON Module Cells: 6 x 10 Module efficiency 17.7% Connector Type: MC4 connector IP67 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.lg.com/us/business/solar-panels/lg-LG290N1C-G3#> (last access: 14.04.25). – Title from the screen.

УДК 662.997

БІОГАЗ ЯК СКЛАДОВА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Пікалов Д.Д., Сотник Є.А., к.т.н., доц. Соколовська І.Є.
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
sokolovskaja7887@gmail.com
Науковий керівник: к.т.н., доц. Соколовська І.Є.

В умовах триваючої війни та енергетичної нестабільності Україна активно шукає шляхи зміцнення своєї енергетичної безпеки. Одним із перспективних напрямів є розвиток біоенергетики, зокрема виробництво біогазу та біометану. Ці джерела енергії не лише сприяють зменшенню залежності від імпорту викопного палива, але й дозволяють ефективно утилізувати органічні відходи, що, своєю чергою, позитивно впливає на екологічну сталість.

Згідно з даними DiXiGroup, потенціал виробництва біогазу та біометану в Україні оцінюється на рівні 21,8 млрд. кубометрів на рік. Такий обсяг є цілком досяжним з урахуванням наявної сировинної бази, особливо в аграрних регіонах, де утворюється значна кількість органічних залишків, придатних для переробки. Це свідчить про надзвичайно великі можливості для нарощування виробництва біоенергії.

Показовим є порівняння з Європою: станом на 2023 рік загальний обсяг виробництва біогазу та біометану в країнах ЄС склав 22 млрд кубометрів [1, 2]. В Україні, хоча цей показник поки скромніший, спостерігається чітка тенденція до зростання – лише у 2023 році було заплановано запуск щонайменше п'яти нових біометанових заводів. Це свідчить про зростання інвестиційної активності та зацікавленість міжнародних партнерів у розвитку української біоенергетики.

Станом на 2024 рік в Україні вже працює понад 80 біогазових установок, що використовують аграрні, побутові та промислові відходи [1-4]. Загальна встановлена потужність цих об'єктів перевищує 135 МВт. У 2023 році обсяг виробленої електроенергії з біогазу становив понад 580 млн кВт·год, що на 15% більше, ніж у попередньому році.

Показовими прикладами ефективного використання біогазових технологій є кілька масштабних комплексів. Зокрема, біогазовий комплекс «Оріль-Лідер» (сmt Єлизаветівка, Дніпропетровська область), запущений у 2012 році, щороку переробляє понад 450 тис. тонн органічних відходів, забезпечуючи генерацію електричної та теплової енергії. У лютому 2025 року підприємство здійснило експорт 27,4 тис. кубометрів біометану до Німеччини, ставши другою українською компанією, що вийшла на європейський ринок біометану.

Ще один приклад – Ладижинський біогазовий комплекс (Вінницька область), який працює з 2017 року на пташиному посліді та побічних продуктах птахофабрики. Потужність станції становить 12 МВт. Завдяки системі

когенерації вироблений біогаз використовується як для електрогенерації, так і для теплопостачання.

Також варто відзначити Теофіпольський біоенергетичний комплекс (Хмельницька область), введений в експлуатацію у 2018 році. Його потужність сягає 15,6 МВт, і він вважається одним із найбільших подібних об'єктів у Європі. Основною сировиною є цукровий жом та кукурудзяний силос, які після ферментації не лише дають біогаз, але й залишають придатні для аграрного використання органічні добрива.

Ці приклади свідчать, що розвиток біогазової енергетики в Україні вже вийшов за межі пілотних проєктів і перетворюється на повноцінну складову стратегії великих аграрно-промислових холдингів щодо забезпечення енергонезалежності, сталого виробництва та екологічної відповідальності.

Попри позитивну динаміку, біоенергетична галузь України стикається з низкою викликів: відсутністю сталої державної підтримки, складністю підключення до газотранспортної системи, нестачею інвестицій і потребою в удосконаленні законодавства. Особливо актуальним є створення прозорого ринку біометану з чіткими правилами гри та стимулюючими механізмами.

Однак, з огляду на наявний ресурсний потенціал, позитивний досвід реалізації проєктів і зростаючий інтерес з боку ЄС, Україна має всі передумови для того, щоб стати впливовим гравцем на європейському ринку біоенергії. Розвиток цієї галузі сприятиме не лише енергетичній безпеці, а й створенню нових робочих місць, зменшенню екологічного навантаження та зміцненню економіки в цілому.

Список літератури:

1. Потенціал виробництва біогазу в Україні становить 21,8 мільярда кубометрів на рік – DiXiGroup [Електронний ресурс] // Укрінформ. – 2024. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3835014-potencial-virobnictva-biogazu-v-ukraini-stanovit-218-milarda-kubometriv-na-rik-dixi-group.html>/ – Назва з екрана.
2. Біогаз та біометан в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uabio.org/biogas-and-biomethane/> – Назва з екрана.
3. Потужність біогазових установок в Україні зросла в три рази [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eenergy.com.ua/news/potuzhnist-biogazovyh-ustanovok-v-ukrayini/> – Назва з екрана.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.

УДК 621.311

РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ «ПУНКТУ НЕЗЛАМНОСТІ» В М. ЛУЦЬК

К.ф.-м.н., доц. Дон Н.Л., Глушко А.В., Васильєв М.І.
Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
don.natalia@kntu.edu.ua

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

В умовах сучасної війни росії проти України критична інфраструктура країни, зокрема енергетичні об'єкти, регулярно зазнає обстрілів, що призводить до масштабних відключень електропостачання. В таких умовах забезпечення безперервного електропостачання «Пунктів незламності» стає критично важливим завданням [1]. З огляду на зазначене дана робота є актуальною.

Досліджуваний «Пункт незламності» розташований в м. Луцьк, вул. ***, 15. «Пункт незламності» (рис.1) забезпечує базові потреби людей під час відсутності електроенергії та комунальних послуг і є важливим об'єктом для забезпечення стабільного функціонування життєдіяльності населення в умовах виникнення аварійних ситуацій, що можуть призвести до відключення енергетичних ресурсів [1].

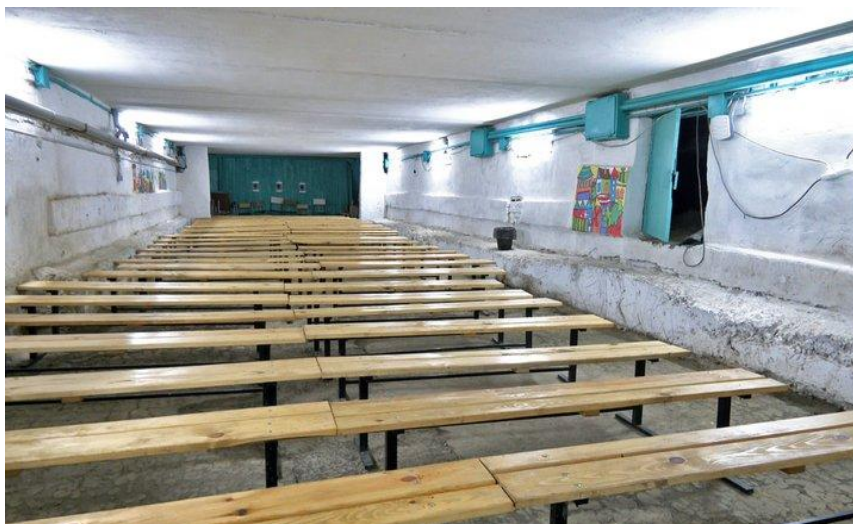


Рисунок 1 – «Пункт незламності» м. Луцьк

Оскільки даний «Пункт незламності» слугує ще й як бомбосховище, дуже важливо в екстрених випадках мати комунікації для базових потреб [1]. Такими комунікаціями є:

- опалення – «буржуйка»;
- мобільний зв'язок та інтернет для підтримки комунікації;
- аптечки для першої медичної допомоги;
- джерело резервного живлення – дизельний генератор потужністю 7кВт

Hyundai DHY 8500SE-T [2];

– інші зручності, що створюють комфортні умови для перебування.

Генератор функціонує на дизельному паливі та має систему ручного або автоматичного запуску, що забезпечує швидке підключення у випадку відключення електроенергії.

Генератор оснащений електронною панеллю управління, яка контролює напругу, частоту та загальну стабільність роботи. Споживання пального генератором становить 1,8 літра на годину при середньому навантаженні (50-75%).

За умови наявності резерву пального у 20 літрів, генератор може працювати безперервно до 10 годин. Це забезпечує автономну роботу пункту протягом суттєвого часу до організації нової поставки пального [2].

Попри ефективність дизельного генератора Hyundai DHY 8500SE-T для «Пункту незламності», можна виділити низку недоліків, які обмежують його автономність і ефективність. Це спонукає до розробки альтернативних систем резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів.

За пікового навантаження об'єкт може споживати 6,5-7 кВт.

Основне встановлене обладнання «Пункту незламності»:

- зарядні станції для пристроїв (ECOFLOW DELTA MAX): до 2 кВт;
- інтернет-обладнання та засоби зв'язку: до 0,5 кВт;
- освітлення приміщення: близько 1 кВт;
- опалення (буржуйка на електричних компонентах): до 2 кВт.

Резервне обладнання «Пункту незламності» – додаткові пристрої, зокрема, медичне обладнання або побутові електроприлади: до 1 кВт.

На основі вихідних даних прийнято до встановлення для «Пункту незламності» в м. Луцьк інтегровану систему резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів (рис. 2).



Рисунок 2 – Інтегрована система резервного живлення EcoFlow DELTA Max на основі фотоелектричних перетворювачів [3]

Основні складові системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для «Пункту незламності» в м. Луцьк наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Складові системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для «Пункту незламності» в м. Луцьк

Компонент	Кількість
Фотоелектрична панель Risen RSM40-8-400MB [3]	4
Зарядна станція EcoFlow DELTA Max 2016Wh [4]	2
Кабель MC4 XT60 5 метрів для EcoFlow	4
Опорні конструкції	4

Система базується на мобільних сонячних панелях ECOFLOW на базі фотоелектричних модулів Risen RSM40-8-400MB (400 Вт кожна) та акумуляторної станції ECOFLOW DELTA 2 MAX з метою забезпечення максимальної мобільності та автономності системи без використання інвертора, що спрощує її конструкцію та експлуатацію. Така фотоелектрична система дозволить покрити поточне споживання пункту (6,5-7 кВт) із запасом для підключення додаткового обладнання в екстрених ситуаціях [1].

В розробленій системі резервного живлення «Пункту незламності» лишається в якості дублюючого джерела наявний дизельний генератор Hyundai DHY 8500SE-T потужністю 7 кВт [2], який має достатній резерв потужності для живлення основного обладнання протягом кількох годин.

Принцип роботи системи резервного живлення в нормальному режимі (коли є живлення від загальної мережі) наступний: фотоелектричні модулі заряджають акумулятори зарядної станції ECOFLOW DELTA MAX. Це дозволяє зберігати енергію протягом дня, що буде використана вночі або в разі екстрених ситуацій. Через вбудовану систему моніторингу можна контролювати рівень заряду, стан батарей та ефективність роботи системи.

У разі відключення централізованого енергопостачання система автоматично переключається на резервні акумулятори зарядної станції ECOFLOW DELTA MAX. Якщо потужності не вистачає, включається додатковий акумулятор ECOFLOW DELTA MAX.

Якщо ємності акумуляторів не вистачає для покриття навантаження через тривалу відсутність живлення, вмикається діями чергового персоналу дизельний генератор Hyundai DHY 8500SE-T [2].

Перший блок ECOFLOW DELTA MAX надасть потужність 3,6 кВт для живлення основних систем – зарядних станцій, освітлення та інтернет-обладнання.

Другий блок ECOFLOW DELTA MAX забезпечить енергопостачання для опалення, додаткових пристроїв та резервного живлення в разі навантаження.

В роботі визначено кількість електричної енергії, генерованої фотоелектричною системою в розрізі року.

Загалом за рік фотоелектрична система здатна виробити 1677 кВт·год. Дані щодо генерації електричної енергії фотоелектричною системою протягом року наведено на рис. 3.

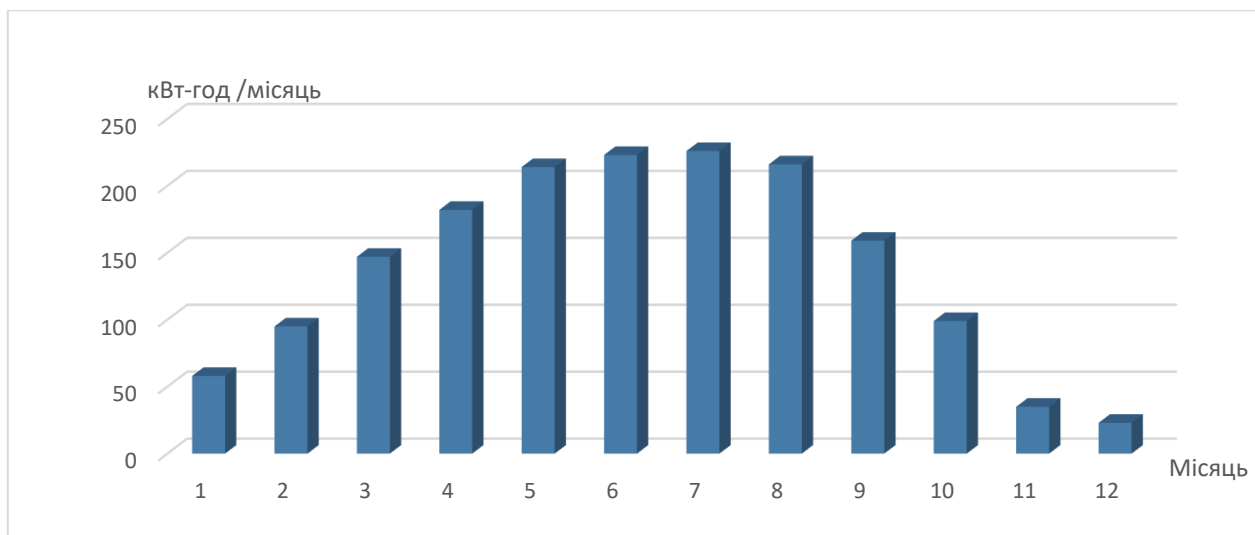


Рисунок 3 – Генерація електричної енергії фотоелектричною системою

Запропонована система резервного живлення має капітальні витрати 194,6 тис. грн. Прибуток від її впровадження становить 17,6 тис. грн/рік, що дозволяє окупити установку за 15 років. Оскільки період окупності проекту є меншим за період експлуатації фотоелектричної системи (25 років), то впровадження системи резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для «Пункту незламності» в м. Луцьк є доцільним.

З точки зору як поточних потреб, так і довгострокової надійності, розроблена система резервного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів для «Пункту незламності» є ефективною. Реалізація запропонованої системи резервного живлення дозволить забезпечити стійкість функціонування об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій.

Список літератури:

1. Питання організації та функціонування пунктів незламності / Постанова Кабінету Міністрів України, 1401-2022-п від 17.12.2022. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1401-2022-%D0%BF#n12> (дата звернення: 16.04.2025). – Назва з екрана.
2. Дизельний генератор Hyundai DHY 8500SE-T (220/380V) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://hyundai-ukraine.com.ua/ua/product/dizelnyi-generator-hyundai-dhy-85-0se-t.html> (дата звернення: 16.04.2025). – Назва з екрана.
3. Зарядна станція EcoFlow DELTA Max 2016Wh | 2000W (DELTA2000-EU) – характеристики | ROZETKA [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://rozetka.com.ua/ua/358516554/p358516554/characteristics/> (дата звернення: 20.04.2025). – Назва з екрана.
4. Сонячна панель Risen RSM40-8-400MB (full black) | ROZETKA від продавця: Aralos [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://rozetka.com.ua/ua/460118109/p460118109/> (дата звернення: 20.04.2025). – Назва з екрана.

УДК 662.997

БІОМАСА В КОНТЕКСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

Кривенчук А.В., Цветков А.О., к.т.н., доц. Соколовська І.Є.
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
sokolovskaja7887@gmail.com
Науковий керівник: к.т.н., доц. Соколовська І.Є.

Енергетична безпека – один із найважливіших аспектів національного суверенітету, особливо у країнах, які перебувають у стані війни або переживають затяжну політичну й економічну кризу. Для України питання енергетичної незалежності набуло особливого значення в умовах повномасштабного вторгнення, коли атаки на об'єкти критичної інфраструктури стали інструментом терору й дестабілізації. У цьому контексті пошук та впровадження альтернативних джерел енергії перестають бути лише екологічним або економічним викликом – вони стають інструментом виживання. Саме тому біомаса, як один із ключових видів відновлюваного енергоресурсу, розглядається сьогодні не лише як джерело тепла, а як фактор стійкості та самозабезпечення держави [1-3].

Біомаса – це різноманітні органічні матеріали природного походження: відходи сільськогосподарського виробництва (солома, лушпиння, гній), залишки деревини, енергетичні культури, побутові органічні відходи, що можуть бути перетворені на теплову або електричну енергію. Вона є локальним, поновлюваним, і що найважливіше – доступним ресурсом, що дає змогу громадам забезпечувати себе теплом без потреби в централізованому постачанні газу чи вугілля.

Переваги біомаси як джерела енергії особливо проявляються у кризових умовах. На відміну від газу, нафти чи вугілля, які потребують імпорту або транспортування на великі відстані, біомаса доступна безпосередньо в регіонах. Це робить її ідеальним варіантом для децентралізованої енергетики, де громади, школи, лікарні та інші об'єкти критичної інфраструктури можуть функціонувати автономно, навіть у разі повного знеструмлення або блокади.

Україна має надзвичайно потужний потенціал у сфері біоенергетики. Щороку в країні утворюється понад 25 мільйонів тонн умовного палива з біомаси – це солома, лісові залишки, лушпиння соняшника, відходи тваринництва тощо. За оцінками експертів, цей обсяг потенційно може замінити до 7–10 мільярдів кубометрів природного газу щороку. У багатьох громадах уже впроваджено котельні на біомасі, зокрема в Кам'янці-Подільському, Тростянці, Житомирі, де біопаливо активно використовується для обігріву комунальних установ, навчальних закладів і житлових будинків. Такі проєкти не лише економлять бюджетні кошти, а й сприяють створенню нових робочих місць та розвитку місцевого аграрного сектору.

Попри значний прогрес у впровадженні біоенергетики, галузь в Україні стикається з низкою глибоких і системних проблем, які стримують її розвиток

та знижують потенціал впливу на енергетичну безпеку держави [4-6]. Насамперед варто відзначити недостатнє фінансування, як з боку державного бюджету, так і з боку приватних інвесторів. Біоенергетичні проекти потребують серйозних початкових вкладень – у високотехнологічне обладнання, логістичні системи, проектування, сертифікацію, а також у навчання персоналу [4, 5]. За відсутності механізмів довгострокового фінансового стимулювання (як-от пільгові кредити, лізинг, компенсації частини інвестицій) інтерес з боку бізнесу залишається фрагментарним.

Ще однією суттєвою проблемою є відсутність цілісної, послідовної державної стратегії розвитку біоенергетики, яка би інтегрувала цей сектор в загальну енергетичну політику країни. Наразі діяльність у сфері біоенергетики є переважно ініціативною або грантово-залежною, без єдиного координаційного центру, що визначає пріоритети, підтримує інновації, розробляє стандарти та забезпечує зворотній зв'язок між владою, бізнесом і громадами.

Крім того, залишається гострою кадрова проблема: в Україні спостерігається дефіцит інженерів, енергоменеджерів, агрономів і техніків, які мають фахову підготовку саме у сфері біоенергетики. Заклади професійної та вищої освіти поки не забезпечують достатньої кількості спеціалістів, що призводить до неякісного проектування та обслуговування об'єктів, а також до втрати довіри до технологій серед потенційних користувачів.

Не менш серйозною є проблема інфраструктури: біомаса, на відміну від газу чи електроенергії, має фізичну форму, потребує транспортування, зберігання, сушіння, подрібнення. Для ефективного функціонування ланцюга постачання потрібна розгалужена система пунктів приймання та переробки сировини, складів, транспорту з відповідною технікою. Наразі більшість громад не мають таких потужностей або мають їх у застарілому стані.

Окремо варто підкреслити інформаційно-комунікаційний бар'єр. Багато представників органів місцевого самоврядування, особливо у сільських громадах, досі не усвідомлюють потенціал біоенергетики як інструменту економічного розвитку й енергетичної самостійності. Відсутність фахових консультацій, прикладних кейсів і доступних навчальних програм гальмує процес прийняття рішень на місцевому рівні.

І, нарешті, доступ до фінансових інструментів для малого та середнього бізнесу залишається обмеженим. Попри наявність міжнародних донорських програм та кредитних ліній (наприклад, ЄБРР, USAID, NEFCO), малі підприємці часто не можуть ними скористатися через складність подачі заявок, брак гарантій, недостатній юридичний супровід або відсутність досвіду участі у конкурсах [2, 4, 5].

Таким чином, для повноцінного розвитку біоенергетичного сектору в Україні необхідне не лише технологічне оновлення, а й створення сприятливого інституційного, фінансового та освітнього середовища, яке дозволить залучити ширші кола зацікавлених сторін і перетворити біомасу з альтернативного джерела на опору енергетичної безпеки держави.

Втім, ці виклики не є нездоланими. Досвід європейських країн – зокрема Австрії, Данії, Швеції – свідчить, що політична воля, державне стимулювання, наукова підтримка та партнерство з громадами здатні перетворити біоенергетику на провідну галузь національної економіки. Для України особливо важливим є поєднання децентралізації енергетичної системи з розвитком локального виробництва палива, що дозволяє не лише підвищити енергетичну стійкість, але й стимулювати регіональний розвиток.

Таким чином, біомаса є не просто джерелом енергії – вона є стратегічним ресурсом у системі енергетичної безпеки України. Її впровадження дозволяє знизити залежність від імпорту, захистити громади в умовах загроз, активізувати місцеві економіки та рухатися в напрямку сталого розвитку. У світі, що змінюється, і в країні, яка бореться за своє майбутнє, кожна тонна пелетів, кожен біогазовий реактор – це не лише внесок у тепло сьогодні, а інвестиція в безпеку та незалежність завтра.

Список літератури:

1. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Біоенергетика [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/diialnist/vidnovliuvalna-enerhetyka/alternatyvna-enerhetyka/bioenerhetyka> (дата звернення: 01.05.2025). – Назва з екрана.
2. Біоенергетична асоціація України. Теплова енергія з біомаси [Електронний ресурс] // UABIO – Біоенергетична асоціація України. – Режим доступу: <https://uabio.org> (дата звернення: 01.05.2025). – Назва з екрана.
3. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
4. Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України (для представників агропромислового комплексу) / Г. Гелетуха, С. Драгнєв, П. Кучерук, Ю. Матвєєв. – 2017. – 37 с.
5. Рекомендації щодо впровадження енергозберігаючих заходів бюджетними установами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://decentralization.ua/uploads/attachment/document/1120/Recommendations_on_Energy_Efficiency_Measures_in_Municipalities.pdf (дата звернення: 01.05.2025). – Назва з екрана.
6. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Інститут технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетухи. – Київ: Академперіодика, 2022. – 373 с.

УДК: 621.311.243

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ФАСАДІ БАГАТОКВАРТИРНОГО БУДИНКУ

Смєшко А.А., Іванов О.С., 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.

Починаючи з 2023 р. об'єднання співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ), які мають фотоелектричну систему, можуть отримати статус «активного споживача», тобто продавати надлишки генерованої електроенергії, виробленої для власних потреб, в мережу [1]. Особливістю систем фотоелектричної генерації, встановлених ОСББ на вертикальних огорожувальних конструкціях будинку, є необхідність ретельного планування розміщення масиву фотоелектричних модулів для досягнення запланованих рівнів генерації електричної енергії. Це пов'язано з наявністю балконних огорожувальних конструкцій, козирків, виступів стін будівлі, які виступають у ролі затіньовувальних поверхонь перетворювачів. Затінення є одним із найбільш критичних факторів, здатним суттєво зменшити ефективність фотоелектричних систем, оскільки через послідовне з'єднання сонячних елементів навіть часткове затінення поверхні модуля може призвести до значних втрат у виробництві енергії всією системою [2].

В даній роботі запропоновано критерії оптимізації розміщення фотоелектричних модулів на фасаді багатоповерхової будівлі та проведено оптимізацію для багатоквартирного будинку, розташованого у м. Кривий Ріг.

Оптимізація розміщення модулів на фасаді будинку має одночасно враховувати низку факторів:

- 1) орієнтація фасаду відносно сторін світу, оскільки максимальна генерація досягається за умови орієнтації модулів на південь;
- 2) наявність перешкод, що затінюють;
- 3) технічні обмеження, пов'язані з конструктивними особливостями будівлі, включаючи несучу здатність огорожувальних конструкцій та наявність вільних площ для встановлення модулів.

Виходячи з умови найбільш повного заповнення площі фасаду фотоелектричними модулями, критерієм оптимізації може виступати максимальне значення питомої встановленої потужності, тобто відношення сумарної потужності розміщених на фасаді фотоелектричних модулів P до площі фасаду, доступної до встановлення S_b :

$$\frac{P}{S_b} \rightarrow \max. \quad (1)$$

Таку оптимізацію доцільно проводити для огорожувальних конструкцій, що не затінюються зовнішніми об'єктами або елементами конструкцій. Недоліком цього підходу є неврахування розбіжності у енергетичних

параметрах різних типів фотоелектричних модулів, що розглядаються у якості альтернативних варіантів.

Врахувати різну ефективність модулів та наявність затінення дозволяє оптимізація за критерієм питомого максимального вироблення енергії, що є відношенням генерованої енергії W до площі, доступної до встановлення модулів:

$$\frac{W}{S_b} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Під час розрахунку вироблення енергії W має враховуватись той факт, що надходження сонячної радіації до затіненої частини модуля відбувається лише у вигляді дифузної складової I'_T з небозводу й відбитої від підстилаючої поверхні, в той час як до незатіненої його частини надходить сумарний світловий потік I_T :

$$W = (I'_T S' + I_T S) \eta_{PV}, \quad (3)$$

де S' та S – площі затіненої та незатіненої частин модуля, відповідно; η_{PV} – ККД фотоелектричного модуля.

Надходження сонячної радіації на приймальну поверхню значною мірою залежить від кут нахилу. Для фасадних фотоелектричних систем найчастіше обирають розташування модулів паралельно огорожувальним конструкціям, що, з одного боку, скорочує витрати на систему кріплення, а, з іншого боку, не є оптимальним з точки зору вловлювання максимальної кількості сонячної енергії. Встановлення під кутом вимагає збільшення відстаней між модулями через створення затінь верхніми рядами нижніх.

Відстань між рядами X для умов незатінення (рис. 1) визначають, виходячи з найбільшого значення кута висоти Сонця α для даної місцевості:

$$X = L(\sin\beta + \cos\beta \cdot \operatorname{tg}\alpha), \quad (4)$$

де L – ширина фотоелектричного модуля.

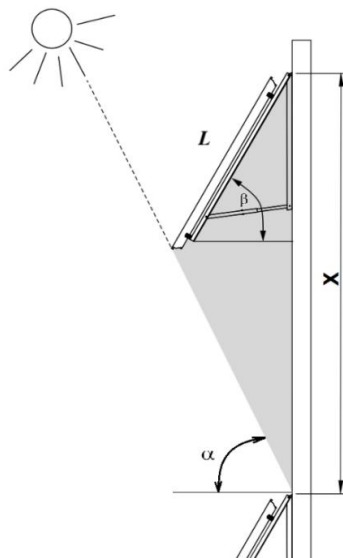


Рисунок 1 – Розташування модулів рядами

Оптимізація кута нахилу фотоелектричних модулів β при розміщенні рядами на фасаді будівлі проводиться шляхом визначення максимальної

кількості сонячної радіації, що надходить на нахилену поверхню модуля за умови розташування рядів на відстанях, що гарантують їх незатінення.

Проведено оптимізацію розміщення модулів (табл. 1) на фасаді десятиповерхового багатоквартирного будинку (типовий проєкт 90-0240.13.88), розміщеного у м. Кривий Ріг (рис. 2). Розглянуто варіанти розміщення фотоелектричних модулів паралельно огорожувальним конструкціям будинку: А – горизонтальними рядами над/між вінами та на огороженнях балконів і технічному поверсі; Б – вертикальними рядами між вікнами та горизонтальними рядами на огороженнях балконів і техповерсі.

Таблиця 1

Монокристалічні фотоелектричні модулі

Фотоелектричний модуль	Р, Вт	Розміри, м×м	ккд, %
SOLA-S132/M12H/660 W	660	2,384×1,303	21,40
Leapton Solar LP182×182-M-78-MH 600	600	2,443×1,134	21,66
JASolar JAM72D30 550/MB	550	2,278×1,134	21,30
JASolar JAM66S30 500/MR	500	2,093×1,134	21,10
TigerNeo JKM445N-54HL4R-(V)-F5-EN	445	1,762×1,134	20,60
Trinasolar 400 W	400	1,754×1,096	20,80
SOLA-S120/M6H/370 W	370	1,765×1,039	20,20
G&T Solar CT60320-M	320	1,665×1,002	19,18

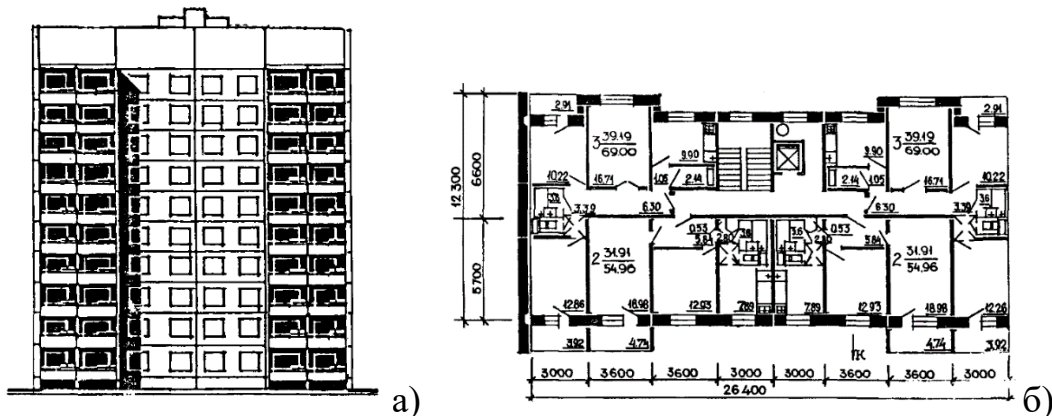


Рисунок 2 – Фасад (а) та план типового поверху (б) будинку

Розрахунок питомих значень встановленої потужності та генерованої енергії (рис. 3) показав, що найвищі показники спостерігаються для розміщення А. Хоча за питомою потужністю максимальне значення дає використання модулів 445 Вт, але за генерацією – модулів 500 Вт. При цьому масив складається з 152 од. і характеризується загальною встановленою потужністю 76 кВт.

Досліджено вплив кута нахилу модулів на надходження сонячної радіації на їх поверхню. Оптимальним кутом нахилу з урахуванням цілорічної роботи для кліматичних умов м. Кривий Ріг є 30°, при цьому кількість радіації на поверхню модулів у порівнянні з вертикальним розміщенням збільшується у

1,5 рази за умови незатінення, тобто, при відстані між рядами більшої за 2,7 м. При такому встановленні покращуються умови охолодження модулів, а отже, збільшується ефективність їх перетворення, а також забезпечується сонцезахист для вікон влітку, і, таким чином, зменшується перегрів приміщень.

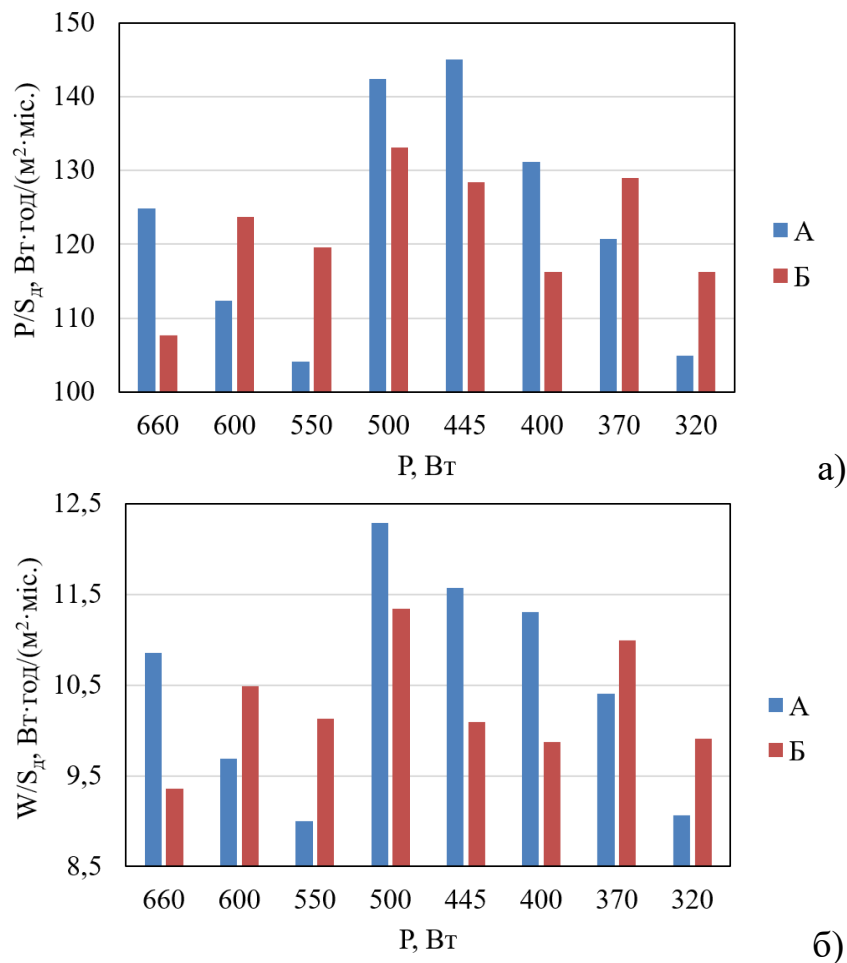


Рисунок 3 – Питома встановлена потужність (а) та питоме вироблення енергії (б) масиву фотоелектричних модулів

Проведення оптимізації розташування модулів на фасадах будівлі за методикою, що пропонується, дозволить покращити техніко-економічні показники фасадних фотоелектричних систем, що є запорукою їх успішної інтеграції у міське середовище як важливої складової на шляху розбудови ефективної та екологічно чистої енергетики України.

Список літератури:

1. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України» № 3220-IX від 30.06.2023 р. / Відомості Верховної Ради, 2023. – №82. – ст.301.
2. Abdelaziz G. Shading effect on the performance of a photovoltaic panel / G. Abdelaziz, H. Nicheм, B.R. Chiheb, G. Rached // 2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC). 20-22 Dec. 2021. – P. 208-213.

УДК 620.9+551.556.3:621.311.24

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ГАЛУЗІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

К.т.н., доц. Нерубацький В.П., Фалєєв Ф.Р., Огурцов С.С.

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків

NVP9@i.ua, fedya.faleev2004@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Нерубацький В.П.

Інноваційні технології в галузі вітроенергетики відіграють значну роль у світовій енергетиці, особливо в контексті сталого розвитку, декарбонізації економіки та переходу до поновлюваних джерел енергії. В умовах кліматичних змін і необхідності зниження залежності від викопних ресурсів, вітроенергетика являє собою не тільки екологічно чистий, а й економічно перспективний спосіб виробництва електроенергії [1, 2].

Сучасні інновації в цій галузі охоплюють широкий спектр напрямків. Від удосконалення конструкцій турбін і матеріалів до цифровізації керування вітропарками і впровадження гібридних енергетичних систем. Одним із найпомітніших досягнень останніх років став масштабний розвиток офшорної вітроенергетики, що дає змогу використовувати потенціал вітру в морських акваторіях із більшою швидкістю та стабільністю повітряних потоків. Такі системи вже доводять свою ефективність у Північній Європі та починають впроваджуватися в інших регіонах.

Істотні інновації спостерігаються і в аеродинаміці вітряків [3]. Нові форми лопатей засновані на біонічних принципах. Наприклад, імітація крил птахів або плавників китів, що дає змогу підвищити коефіцієнт корисної дії турбін. Поява безлопатевих вітрогенераторів, що використовують коливальні рухи, мінімізує механічний знос і шум, що особливо актуально під час розміщення поруч із житловими районами.

Інженери та науковці активно працюють над інтеграцією композитних матеріалів з підвищеною міцністю та стійкістю до екстремальних погодних умов, що подовжує термін служби установок і знижує вартість обслуговування. Одночасно з цим впроваджуються системи розумного керування вітропарками з використанням штучного інтелекту та інтернету речей, що дає змогу в реальному часі оптимізувати генерацію, прогнозувати технічні несправності та адаптуватися до змін вітрового навантаження [4, 5].

Одним із пріоритетних напрямів стає інтеграція вітрових установок із системами накопичення енергії, насамперед із літій-іонними та натрієвими акумуляторами. Це дає змогу згладжувати коливання вироблення енергії та підвищує надійність електропостачання, особливо в ізольованих або автономних енергетичних системах.

Слід відзначити і розвиток гібридних енергетичних систем, що поєднують вітряні та сонячні джерела, особливо в поєднанні з накопичувачами енергії. Такі комплекси забезпечують більш стабільну подачу енергії та ефективніше використовують інфраструктуру. У деяких країнах успішно тестують кінетичні

накопичувачі (flywheel), а також водневі технології, що дають змогу використовувати надлишкову вітряну енергію для виробництва «зеленого» водню за рахунок електролізу.

Інноваційні технології у вітроенергетиці широко впроваджуються в країнах Європи [6], де вітрова енергетика стала невід'ємною частиною національних енергетичних стратегій. Одним із найяскравіших прикладів є Данія – країна, яка ще в 1990-х роках стала першопроходцем офшорної вітроенергетики, а сьогодні використовує інноваційні плаваючі вітряні турбіни, встановлені в глибоководних районах Північного моря. Ці установки, побудовані на платформенній основі, дають змогу значно розширити географію використання вітрового потенціалу.

У Німеччині інновації розвиваються як у технічній, так і в системній площинах. Країна активно поєднує вітрові установки із системами накопичення енергії, особливо у східних та північних землях, де зосереджені найбільші вітропарки. Такі системи дають змогу згладжувати пікові навантаження та забезпечувати стабільність енергопостачання. Уздовж узбережжя Північного моря, в рамках державної програми Energiewende, реалізуються проєкти з виробництва «зеленого» водню, коли енергія, що виробляється вітрогенераторами, спрямовується на електролізери, що дає змогу створювати екологічно чисте паливо для промисловості та транспорту. Також у Німеччині активно тестуються проєкти розумних мереж (smart grids), у яких вітряні електростанції працюють у тісній інтеграції зі споживачами та іншими джерелами енергії.

Таким чином, європейські країни демонструють високий ступінь зрілості у використанні інновацій у вітроенергетиці. Такі технології, як плаваючі платформи, штучний інтелект, системи зберігання енергії, цифрові двійники і гібридні підстанції, – стали невід'ємною частиною як стратегічного планування, так і практичної експлуатації вітропарків. Ці приклади показують, що успішний розвиток вітроенергетики неможливий без комплексного підходу, в якому поєднуються інженерні досягнення, цифрові технології та продумана державна політика.

Україна також активно розвиває вітроенергетичний напрямок. На півдні країни, особливо в Миколаївській, Херсонській, Запорізькій та Одеській областях, зосереджений значний вітровий потенціал, що робить регіон привабливим для будівництва вітропарків. З 2022 року інтерес до будівництва відновлювальної генерації значно посилюється через потребу в децентралізації та захисті енергетичної інфраструктури.

Таким чином, інноваційні технології у вітроенергетиці трансформують обличчя сучасної енергетики, сприяючи не лише технічному прогресу, а й формуванню нового сталого мислення у сфері виробництва енергії. Україна, незважаючи на виклики, демонструє готовність до впровадження таких рішень, що підтверджується як реальними проєктами, так і активною освітньо-науковою роботою в цій галузі.

Список літератури:

1. Dincer F. The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world / F. Dincer // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15, Iss. 9. – P. 5135–5142.
2. Плахтій О.А. Динаміка, концепції та перспективи розвитку вітрової енергетики / О.А. Плахтій, В.П. Нерубацький, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест, А.В. Синявський // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2022. – Том 27, № 4. – С. 3–14.
3. Firoozi A.A. Innovations in wind turbine blade engineering: Exploring materials, sustainability, and market dynamics / A.A. Firoozi, A.A. Firoozi, F. Hejazi // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, Iss. 19. – 8564.
4. Нерубацький В.П. Аналіз структур і динаміки систем керування вітровими генераторами / В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, Д.А. Гордієнко, Г.А. Хоружевський, Р.О. Харін // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. – 2022. – Вип. 201. – С. 14–30.
5. Nerubatskyi V. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network / V. Nerubatskyi, D. Hordiienko // *Power engineering: economics, technique, ecology*. – 2023. – No. 1. – P. 87–91.
6. Wolniak R. Development of wind energy in EU countries as an alternative resource to fossil fuels in the years 2016–2022 / R. Wolniak, B. Skotnicka-Zasadzień // *Resources*. – 2023. – Vol. 12, Iss. 8. – 96.

УДК: 662.997

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ СОНЯЧНОГО НАГРІВУ ВОДИ В SYSTEM ADVISOR MODEL

Турчин В.Ю., 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.

Установки сонячного нагріву води найчастіше використовують для забезпечення потреб гарячого водопостачання та підтримки систем опалення. Завданням проектування є підбір компонентів системи для забезпечення певної частки покриття теплового навантаження, при якій досягається високий коефіцієнт використання сонячної енергії, ефективна робота колекторів та забезпечується тривалий термін експлуатації установки (без режимів стагнації). Використання програмних середовищ для моделювання роботи систем дозволяє визначити характеристики та режими функціонування, підібрати компоненти та провести оптимізацію за технічними або техніко-економічними показниками.

В даній роботі проведено моделювання роботи систем сонячного нагріву води в програмному середовищі System Advisor Model (SAM) [1].

В якості об'єкта обрано приватний житловий будинок, розташований у м. Херсон. Запропонована система сонячного нагріву води для цілорічного покриття потреб гарячого водопостачання, що потребує використання двоконтурної схеми та гліколевого теплоносія у геліоконтурі. Підбір компонентів системи здійснювався з урахуванням рекомендацій [2]: система сонячного нагріву води для одноквартирних будинків повинна покривати близько 60 % навантаження гарячого водопостачання.

Добове споживання гарячої води 3 мешканцями будинку визначено згідно СНіП 2.04.01-85 і становить 285 л/добу. Об'єм бака-акумулятора 300 л дорівнює добовому споживанню гарячої води. Площа плоских сонячних колекторів визначалася з розрахунку 60 л об'єму бака на 1 м² площі колектора. Підбрано два колектори Vitosol 200-F площею 2,52 м² кожен. Кут нахилу сонцеприймальної поверхні обрано таким, що дорівнює широті місцевості.

На основі моделювання роботи системи сонячного нагріву води, проведеного в програмі SAM для типового метеорологічного року, визначено, що річна енергопотреба будинку з гарячого водопостачання становить 4786 МВт·год, з них система сонячного нагріву води забезпечує 2767 МВт·год, а 2019 МВт·год покриває дублююче джерело енергії (ТЕН). Частка покриття навантаження при цьому складає 56,9%: влітку досягається повне покриття навантаження, а в зимові місяці – близько 22% (рис. 1).

Річна кількість генерованої сонячними колекторами та акумульованої в баці-акумуляторі теплової енергії становить 3118 МВт·год, в той час як

спожита енергія– 2767 МВт·год, тобто коефіцієнт використання сонячної генерації сягає 88,7%. Надлишки теплової енергії спостерігаються в літні місяці (рис. 1), що призводить до прогріву води в баці-акумуляторі максимум до 80 °С (рис. 2, а). При використанні режиму термозахисту баку-акумулятора встановлюється максимальна допустима температура його прогріву, наприклад 95°С, до якої може нагріватися вода при відведенні теплоти від сонячних колекторів. Після досягнення цієї максимальної температури в геліоконтурі може виникнути режим стагнації. Як видно з рис. 2, а для даної системи режими стагнації не спостерігаються.

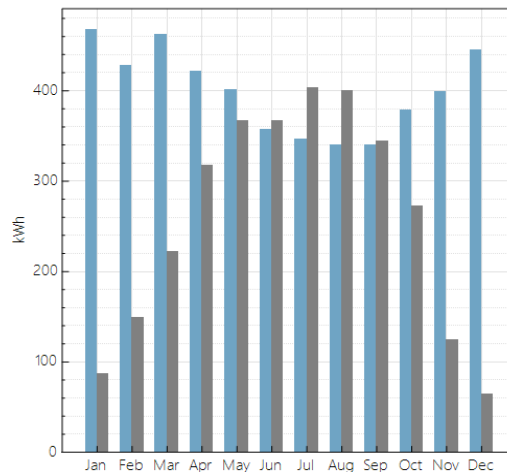


Рисунок 1 – Вироблення (сірим кольором) та споживання (блакитним) теплової енергії

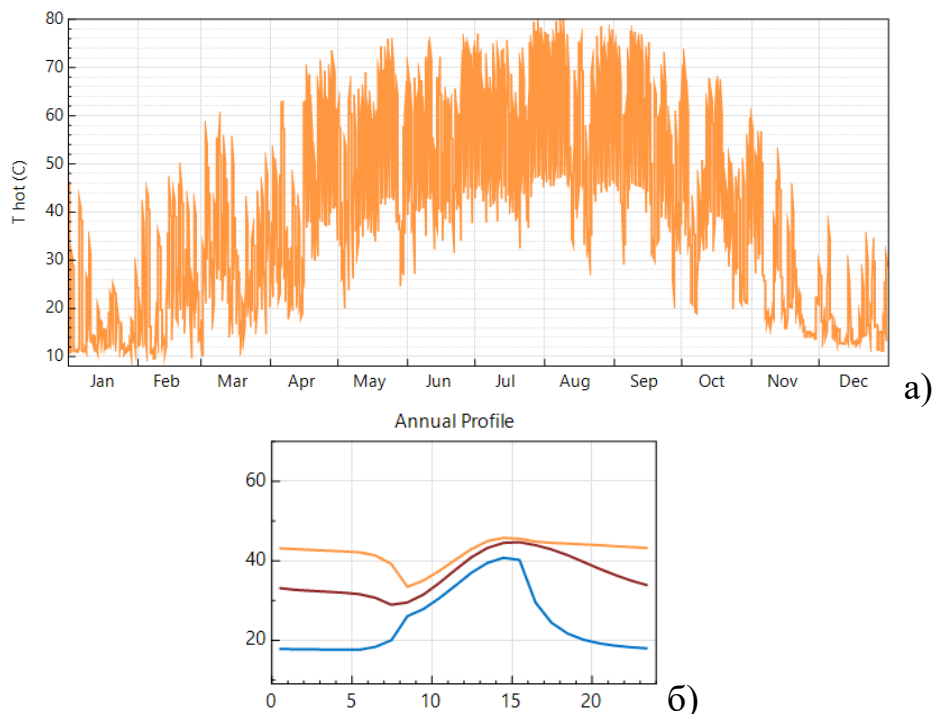


Рисунок 2 – Температура води в верхній частині бака-акумулятора (помаранчевий колір), в нижній (блакитний) частині, середня (коричневий) температура

Зранку температура води в баці-акумуляторі мінімальна, що підвищує

ефективність роботи сонячних колекторів, а найвища температура досягається в післяполуденні години (рис. 2, б). Тому для періоду року з високими значеннями надходження сонячної радіації дублююче джерело теплоти використовується тільки для проходження ранкових максимумів споживання, а з жовтня по квітень – використовується цілодобово (рис. 3).

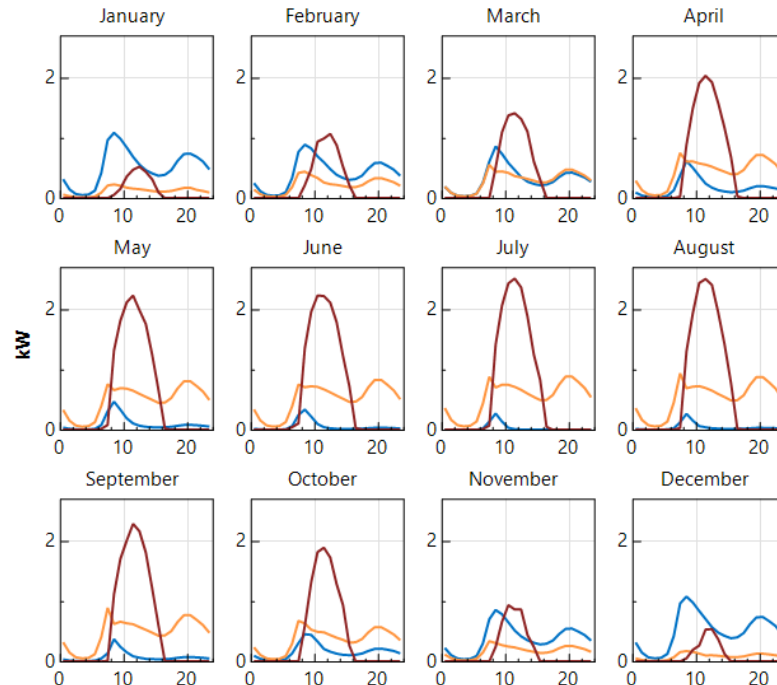


Рисунок 3 – Потужність дублюючого джерела теплоти (синій колір), системи сонячного нагріву води (коричневий), споживання сонячної теплоти (помаранчевий)

Програма SAM дає можливість проведення оптимізації системи нагріву води. Так, максимальне значення частки покриття навантаження 57,1% досягається або при збільшенні об'єму бака-акумулятора до 400 л, або при зменшенні кута нахилу колекторів 40°.

Програма System Advisor Model дозволяє розробити систему сонячного нагріву води, визначити основні характеристики системи, візуалізувати режими роботи, дослідити вплив кліматичних, режимних та технічних даних на енергетичні параметри та економічні показники системи, що моделюється, а також проводити оптимізацію систем генерації.

Список літератури:

1. NREL. System Advisor Model (SAM) [Electronic resource]. – Access mode: <https://sam.nrel.gov/>. – Title from the screen.
2. Viessmann. Інструкція з проектування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.viessmann.ua/content/dam/public-brands/ua/pdf/products/5799061VPA00020_1.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/5799061VPA00020_1.pdf – Назва з екрана.

UDC 621.311.2

DISTRIBUTED GENERATION AS AN ANSWER TO CURRENT ENERGY PROBLEMS

Venedyktova D.V.

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv

venediktova253647@gmail.com

Scientific advisor: senior lecturer Maslova T.B.

Introduction. Distributed generation is one of the principal solutions to the current problems of the modern energy sector. In the context of growing challenges related to energy security, environmental sustainability and economic efficiency, traditional approaches to electricity generation and distribution are gradually losing their relevance [1]. Centralised power systems, while providing significant capacity, are often exposed to crises and geopolitical risks. Distributed power generation offers an alternative way to decentralise generation, reduce transmission losses and increase consumer autonomy.

Objective. This study analyzes the role of distributed generation as a solution to current energy sector challenges. It examines its principles, benefits for energy security, potential for addressing Ukraine’s energy issues and integration with modern technologies to create a sustainable, efficient, and environmentally balanced system.

Methods. The main principle of distributed generation is to bring electricity production closer to the consumer, which reduces dependence on main power grids and reduces losses associated with long-distance transmission [1]. This method of altering the energy domain offers numerous benefits that directly enhance the nation’s safety in energy and self-reliance from foreign entities. The increasing need for cybersecurity and safeguarding essential systems is crucial in our current context.

Unlike the conventional approach, where electricity is produced by sizeable centralized stations and delivered to users via an intricate grid of power lines, distributed generation entails establishing a network of medium-sized power plants situated close to or within the consumer’s area. These include solar panels installed on roofs, mini wind turbines, tiny water power plants, biogas plants and combined heat and power systems.

There are a number of advantages of distributed generation in solving modern problems.

Distributed generation significantly increases the resilience of the energy system to external attacks, such as attacks by shahedis or missiles [1]. Unlike centralised power plants, which are of vulnerable infrastructure, distributed energy systems are harder to disrupt due to their distributed nature and being in large numbers. Even if mishaps happen, the breakdown of single units or focused assaults on control mechanisms will not cause widespread power cuts as additional power sources remain self-sufficient. This becomes evident in the time of crises, as backup power

supplies support essential utilities despite failures in the main grid.

In Ukraine, small and medium-sized power plants that produce both electricity and heat operate well to keep energy flowing when there are problems. Metropolises such as Cherkasy and Zhytomyr have already employed these units to energize vital functions during power outages, underscoring the practical advantages of distributed generation in bolstering energy reliability [2].

As one knows, the diversity of energy sources is an important factor in energy security. By utilizing renewable resources such as solar (photovoltaic cells), wind (windmills), biogas facilities, hydrogen energy, and mini-hydroelectric stations distributed generation can enhance the energy mix. Moreover, distributed generation significantly contributes to the environmental protection by reducing greenhouse gas emissions. In fact, the use of the above mentioned renewable energy sources will reduce the carbon footprint associated with electricity production [3]. This creates a balanced energy system that greatly reduces the dependence on fossil fuel imports. For example, local biogas plants allow not only the efficient use of agricultural waste, but also ensure stable electricity supply in villages.

In traditional centralised power systems, a significant portion of the electricity produced (up to 10-15%) is lost during transmission through trunk lines. Distributed generation, by locating power generation closer to the user, considerably reduces these losses, thus increasing the overall efficiency of the power system [3]. It also reduces the need to build expensive transmission infrastructure and lowers maintenance costs.

The ecological facets of decentralized power generation also influence enduring energy stability. Decreasing carbon emissions and detrimental chemicals aids in alleviating climate change impacts, which potentially disrupt power grids and electricity reliability. It is natural that harnessing green energy should lessen the burden exposed on water supplies, which is crucial for conventional steam-based power stations. The proliferation of decentralized energy production fosters employment in local areas, spurs innovation, and aids regional economic growth. As a matter of fact, households and small businesses are able not only to meet their own energy needs, but also to sell surplus electricity, transforming from passive consumers to active participants in the energy market [4].

The development of technologies in the field of virtual power plants opens up new prospects for the efficient integration of distributed energy sources into a single energy system. Such platforms enable centralised management of a set of small generators, increasing the stability of power supply and optimising the use of resources [5]. In addition, virtual power plants empower small electricity producers by providing them with access to market mechanisms and promoting competition in the energy sector.

Results. Combining energy storage systems with distributed generation creates an extra level of energy security. Modern storage methods, including lithium-ion batteries and pumped storage plants, help to effectively address the problem of instability in the generation from renewable energy sources. By storing surplus energy, peak loads can be balanced and stable power supply can be ensured even in case of temporary absence of primary energy sources. In addition, advanced energy

storage technologies contribute to progress in related industries, from electronics to materials science [6].

It is important to note the role of Smart Grids in improving the efficiency of distributed generation. Modern energy management systems based on artificial intelligence and machine learning allow optimising load distribution, predicting electricity consumption and ensuring stable interaction between numerous distributed energy sources as a single system. The introduction of digital technologies enhances the cybersecurity of power grids by promptly identifying and neutralising potential threats [6].

Virtual power plants (VPPs) are more than just a technical advancement – they are game changers for the energy sector. VPPs enhance grid reliability by seamlessly integrating renewables, decentralizing energy systems, and addressing flexibility challenges, paving the way for a more accessible, efficient power supply [5].

Conclusion. The modern energy system is grappling with a diverse set of ongoing challenges that demand systemic responses to technological, economic and incentivising, regulatory and social plans. We could face these challenges more effectively, especially by building multi-faceted energy systems that marry benefits from centralized and decentralized generation.

Power networks become more resilient and powerful, which are important in the background of global changes and increasing threats to the electrical system worldwide. The aim is to promote the development of new energy storage techs, improve renewables efficiencies and advance smarter grids. As advanced technology continues to be employed on a larger scale (e.g. lithium ion batteries, hydroelectric stations and Smart Grid), energy processes can become much more targeted and predictable by unwavering power.

Technology advancement on its own is not enough, some reductions are needed for the new energy systems too. The distribution and Smart Grid play a critical role in distribution optimisation, with the emphasis on loss reduction as well as system efficiency. Investments in this area will help to bolster the country's technological capabilities and fuel independence of energy.

A second major concern is the creation and implementation of large scale energy security programs. They should take into account various threats, including physical attacks, natural disasters and cyber incidents [3]. Improving monitoring systems, strengthening cyber defences, and expanding opportunities for autonomous power supply will help minimise risks and guarantee the stability of the power grids.

The last but not least aspect is the development of a socially oriented energy policy that promotes the availability of energy resources for all segments of the population. The development of energy communities and cooperatives allows people to directly participate in shaping the energy sector, contributing to its democratisation and increasing the level of responsibility for energy consumption. This not only ensures efficient resource management, but also creates additional economic opportunities for small businesses and households [7].

Finally, it can be concluded that only a complex interrelated approach that considers all of the factors above will help us to solve the challenges in modern energy sector for the years to come, providing stable, affordable and green electricity

supply, and therefore laying the foundation for economic development and welfare in the 21st century.

References:

1. Adefarati T. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review / T. Adefarati, R.C. Bansal // *IET Renewable Power Generation*. – 2016. – 10(7). – P. 873-884.
2. Distributed cogeneration can help improve the resilience and reliability of providing energy to critical infrastructure in Ukrainian cities [Electronic resource] / USAID Energy Security Project. March 30, 2023. – Access mode: <https://energysecurityua.org/news/distributed-cogeneration-can-help-improve-the-resilience-and-reliability-of-providing-energy-to-critical-infrastructure-in-ukrainian-cities/> – Title from the screen.
3. Stein Z. Distributed Generation (DG). Benefits, Types, & Environmental Impacts [Electronic resource] / Z. Stein // Carbon collective corporation. October 1, 2024. – Access mode: https://www.carboncollective.co/sustainable-investing/distributed-generation-dg?utm_source=chatgpt.com – Title from the screen.
4. Vey A. Web3 and Decentralized Energy Networks: Empowering Communities to Take Control [Electronic resource] / A. Vey // EET&D Magazine. – 2024. – 1(27). – P. 16-19. – Access mode: <https://electricenergyonline.com/energy/magazine/1419/article/green-ovations-web3-and-decentralized-energy-networks-empowering-communities-to-take-control.htm> – Title from the screen.
5. What is a virtual power plant (VPP) [Electronic resource] / GridX. December 16, 2024. – Access mode: <https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-a-virtual-power-plant-vpp> – Title from the screen.
6. Mwasilu F. Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration / F. Mwasilu, J.J. Justo, E.K. Kim, T.D. Do, J.W. Jung // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – 34. – P. 501-516.
7. Gielen D. The role of renewable energy in the global energy transformation / D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M.D. Bazilian, N. Wagner, R. Gorini // *Energy Strategy Reviews*. – 2019. – 24. – P. 38-50.

УДК: 621.311.243

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

К.т.н., доц. Андропова О.В., Данилюк В.В.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
kev_ku@ukr.net

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

Проектування систем енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії потребує оцінки кліматичних умов місця розташування, графіку енергоспоживання об'єкта, вимог до надійності енергопостачання. Ці фактори визначатимуть структуру системи генерації, її енергетичну та економічну ефективність. Програмні середовища RETScreen, System Advisor Model, HOMER, DER-CAM, EnergyPro, TRNSYS, що використовуються для проектування систем, допомагають користувачеві на основі техніко-економічного аналізу проекту провести оптимізацію систем генерації за обраними ним критеріями. Інструментом, який дозволяє оптимізувати системи генерації на основі відновлюваних джерел енергії на передпроектній стадії розробки, є програма REopt [1].

Веб-інструмент REopt оцінює економічну доцільність підключених до мережі фотоелектричних систем, вітроенергетичних установок, когенераційних систем, геотермальних та повітряних теплових насосів, а також накопичувачів електричної та теплової енергії на комерційних та невеликих промислових об'єктах. Він дозволяє визначати розміри систем та стратегії диспетчеризації, які мінімізують вартість енергії протягом життєвого циклу проекту. Веб-інструмент REopt також оцінює час, протягом якого виробництво та зберігання енергії системою можуть підтримувати критичне навантаження об'єкта під час відключення мережі, і дозволяє користувачеві вибрати оптимізацію: за економічними показниками, для енергетичної стійкості або цілей чистої енергії. При виборі критерію «економічні показники» програма оптимізує розміри системи та стратегію диспетчеризації для мінімізації вартості енергії. Критерій енергетичної стійкості додає додаткове обмеження: система генерації повинна без електромережі підтримувати критичне навантаження об'єкта протягом визначених користувачем періодів відключення. Для мінімізації платежів за забруднення оточуючого середовища користувач обирає критерій «чиста енергія». Особливістю програми REopt є те, що користувачеві не потрібно вводити встановлену потужність системи генерації, а також можливість задавати кілька технологій генерації та зберігання енергії одночасно [2].

З використанням програми REopt проведено оптимізацію мережевої фотоелектричної системи генерації для одноквартирного будинку, розташованого у м. Херсон. Першим кроком роботи з програмою є вибір технологій перетворення та зберігання енергії: обрано фотоелектричну систему з установкою зберігання енергії та електричну мережу. Для введення

кліматичних даних місця розташування системи програма потребує введення координат місцевості. Передбачається використання стимулювання вироблення енергії за механізмом самовиробництва, що потребує даних щодо тарифів на електричну енергію, обмеження максимального розміру системи генерації та графіку споживання енергії об'єктом, який задано як типовий графік побутового споживача, корегований з урахуванням розмірів щомісячного споживання енергії. Оскільки оцінка грошових потоків проєкту проводиться на основі дисконтованих показників, необхідними даними є ставка дисконту, що обиралася як облікова ставка Національного банку України, рівень зростання витрат на експлуатацію та технічне обслуговування, яке задано на рівні інфляції, та темпи зростання тарифів на електроенергію. Оптимізація системи генерації за економічними критеріями потребує типових значень вартості 1 кВт встановленої потужності та 1 кВт·год накопиченої енергії. Технічні параметри систем генерації та зберігання енергії передбачають мінімальний набір даних щодо ефективності, орієнтації та нахилу фотоелектричних модулів, співвідношення потужності інвертора та фотоелектричного генератора, глибину розряду акумуляторів, відсотка втрат системою генерації і ефективності інвертора та циклу заряду-розряду акумуляторів.

Оптимізація за критерієм економічної ефективності дає значення встановленої потужності фотоелектричного генератора 3кВт (DC), при цьому система не передбачає використання установки зберігання енергії. Потенційна економія витрат протягом всього експлуатаційного періоду 25 років становить 4 847 дол. Запропонована система покриває річне навантаження об'єкта на 100%, генеруючі 3828 кВт·год/рік електрики, з яких 1202 кВт·год заміщує мережеву енергію, а 2626 кВт·год експортується в мережу. На основі погодинного моделювання роботи системи протягом типового року програма визначає графік диспетчеризації об'єкту (рис. 1), а також визначає зниження навантаження в результаті впровадження оптимізованої системи генерації (рис. 2).

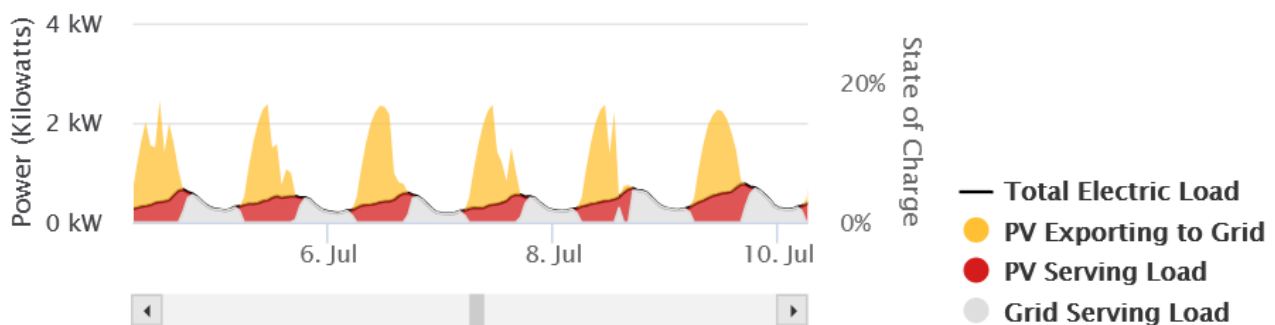


Рисунок 1 – Вироблення та споживання енергії

Зниження витрат на купівлю електрики з мережі становить 398 дол. за рік або 8620 дол. за 25 років експлуатації системи. Капітальні витрати у сумі 2717 дол. окуповуються за 5,18 років. Собівартість вироблення електрики становить 0,152 дол./кВт·год.

При оптимізації за критерієм енергетичної стійкості задано додаткове джерело енергії, тобто дизель-генератор. Стійкість системи енергозабезпечення перевірялася за умови 24 годинного відключення для середини кожного сезону року, при цьому критичне навантаження задавалося на рівні 50%.

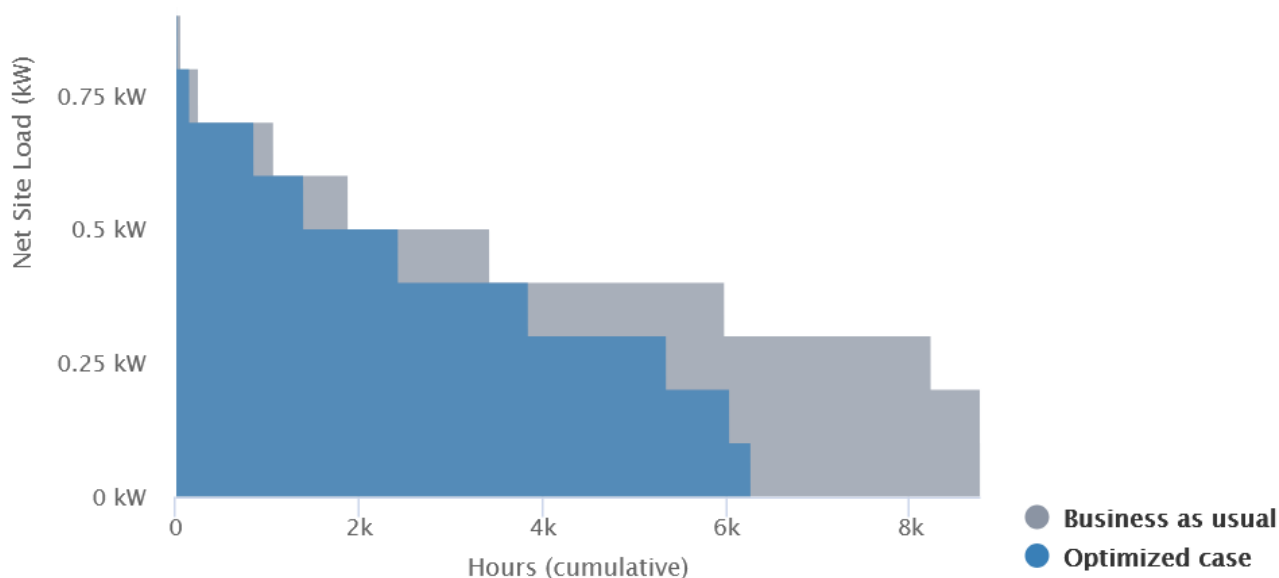


Рисунок 2 – Зниження навантаження за тривалістю

Оптимізована за таких умов система складається з фотоелектричного генератора встановленою потужністю 3 кВт (DC) та дизель-генератора 1 кВт (AC), який використовується тільки на час відключення централізованого електропостачання. Капітальні витрати на систему зростають до 3317 дол., чиста поточна цінність зменшується до 3901 дол., а період окупності збільшується до 6,19 років. Незначна тривалість періодів відключення мережі не позначається на собівартості виробленої енергії.

Порівняння варіантів оптимізованих систем енергозабезпечення одноквартирного будинку, що реалізує надлишки генерованої енергії за механізмом самовиробництва, проведене за критеріями економічної ефективності та енергетичної стійкості, показує, що оптимальною потужністю фотоелектричного генератора в обох випадках є 3кВт, що дозволяє для кліматичних умов місця розташування покрити навантаження на 100%. Забезпечення надійності системи генерації досягається впровадженням додатково дизель-генератора, що покриває критичне навантаження об'єкту в моменти відключення електромережі. При цьому зростають капітальні витрати на 600 дол., експлуатаційні – на 20 дол./рік, а період окупності – на 1 рік.

Список літератури:

1. REopt: Renewable Energy Integration & Optimization [Electronic resource]. – Access mode: <https://reopt.nrel.gov/tool>. – Title from the screen.
2. The REopt Web Tool User Manual [Electronic resource]. – Access mode: <https://reopt.nrel.gov/tool/reopt-user-manual.pdf#page=5>. – Title from the screen.

УДК 621.311

НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЕЛЕМЕНТИ ДЛЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Верташ Д.С., к.т.н., доц. Войтенко Ю.В.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, м. Дніпро
vertash@365.dnu.edu.ua

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

Глобальний попит на електроенергію у світі зростає щороку, проте наслідки традиційних методів отримання енергії дуже впливають на зміну клімату, яка стає все більше і більше вираженою. Існує нагальна потреба в ефективних, стійких енергетичних рішеннях. Цим рішенням можуть стати сонячні фотоелектричні технології, які перетворюють сонячне світло безпосередньо в електрику за допомогою напівпровідникових матеріалів. Вони значно розвинулися з моменту свого створення, що призвело до підвищення ефективності, покращення матеріалів та ширшого застосування, що зробило сонячну енергію більш життєздатною та конкурентоспроможною альтернативою традиційним джерелам енергії. Підвищення ефективності фотоелектричних модулів безпосередньо сприяє кращій продуктивності та економічній ефективності, дозволяючи виробляти більше енергії з тієї ж кількості сонячного світла. Удосконалення матеріалів, таке як розробка нових напівпровідників і покриттів, призвело до підвищення ефективності перетворення енергії та більшої довговічності фотоелектричних систем. Прогрес у застосуваннях розширив використання сонячних фотоелектричних систем у різних секторах, сприяючи більш універсальній та доступній інфраструктурі відновлюваної енергетики [1]. У зв'язку з появою безлічі нетрадиційних методів виготовлення функціонуючих сонячних елементів, фотоелектричні технології можна розділити на чотири основних покоління:

У категорію першого покоління входять технології фотоелектричних елементів на основі монокристалічного та полікристалічного кремнію та арсеніду галію (GaAs). Це покоління обмежується лише «технологіями на основі кристалічного кремнію». Такі сонячні елементи зараз складають понад 80% встановленої потужності світу і мають 90% частки ринку.

Сонячні елементи на основі монокристалічного кремнію (m-Si) характеризуються високим ККД (15-24%), енергетичною щільністю 1,1 еВ. Перевагами є стабільність, висока продуктивність та тривалість експлуатації – близько 25 років. Недоліками є висока вартість, чутливість до температури середовища та втрати матеріалу. Сонячні елементи на основі полікристалічного кремнію (p-Si) мають трохи нижчий ККД (10-18%), енергетична щільність – 1,7 еВ. Тривалість експлуатації – 14 років. Перевагами є простота виготовлення (дешевше виробництво) та мінімальні відходи. Недоліками є нижча ефективність у порівнянні з елементами на основі m-Si та висока температурна чутливість. Сонячні елементи на основі GaAs мають найвищий ККД серед

фотоелектричних елементів першого покоління – 28-30%, характеризується енергетичною щільністю в 1,43 еВ та тривалістю використання – 18 років. Основними перевагами є нижча чутливість до температури, краще поглинання сонячного випромінювання, висока стабільність та ефективність. Але є суттєвий недолік – надзвичайно дороге виробництво [2].

Друге покоління включає розвиток технології фотоелектричних елементів першого покоління, а також розвиток технології тонкоплівкових фотоелектричних елементів на основі мікрокристалічного кремнію ($\mu\text{c-Si}$), аморфного кремнію (a-Si), фотоелементів з мідно-індій-галій-селеніду (CIGS) та кадмій-телуриду/кадмій-сульфіду (CdTe/CdS). Тонкоплівкові елементи на основі CdTe , CIGS і аморфного кремнію розроблені як дешевша альтернатива кремнію, з кращими механічними властивостями для гнучких застосувань, але зниженою ефективністю. Їх поява потребувала нових методів вирощування й залучила суміжні галузі, зокрема електрохімію.

Сонячні елементи на основі аморфного кремнію (a-si) мають ККД 5-12%, енергетичну щільність – 1,7 еВ, тривалість експлуатації – 15 років. Перевагами є дешевизна, нетоксичність та високий коефіцієнт поглинання. Недоліками є нижча ефективність, складність у виборі легуючих матеріалів, низький термін служби міноритарної суміші. Для сонячних елементів на основі кадмій-телуриду/кадмій-сульфіду (CdTe/CdS) ККД у межах 15-16%, енергетична щільність 1,45 еВ, час експлуатації – 20 років. Переваги: Висока швидкість поглинання, менша кількість матеріалу для виробництва. Обмеження: нижча ефективність, токсичність, обмеженість використання, чутливість до температури. Сонячні елементи на основі міді, індію, галію селеніду (CIGS). ККД – 20%, енергетична щільність 1,7 еВ, час використання – 12 років. Має перевагу – менша кількість матеріалу для виробництва, та недоліки – висока вартість та чутливість до температури, низька стабільність та ненадійність [2].

Третє покоління налічує фотоелектричні технології, які засновані на більш сучасних хімічних сполуках. Крім того, до цього покоління належать і технології з використанням нанокристалічних «плівок», квантових точок, сенсibilізованих до барвників сонячних елементів, сонячних елементів на основі органічних полімерів тощо. Сонячні елементи третього покоління охоплюють тандемні, перовскітні, органічні, чутливі до барвників (DSSC) і квантові (QD) елементи. Вони варіюються від дешевих низькоефективних (DSSC, органічні) до дорогих висоефективних багатоперехідних елементів III-V. Хоча ці технології ще слабо присутні на ринку, дослідження тривають понад 25 років. Сучасні тенденції зосереджені на підвищенні ефективності через створення додаткових енергетичних рівнів у напівпровідниках (IBSC, IPV) і застосування іонної імплантації [2].

Сонячні елементи на основі чутливих до барвників фотоелектричних елементів мають ККД: 5-20%. Їх перевагами є низька вартість, нижча внутрішня температура, надійність і подовжений термін служби. Недоліками є токсичність та проблеми зі стабільністю температури. Спряжені полімери та органічні напівпровідники успішно працюють у плоских панельних дисплеях та світлодіодах, тому вони вважаються передовими матеріалами в сучасному

покоління фотоелектричних елементів. Полімерні/органічні фотоелектричні елементи поділяють на чутливі до барвника органічні фотоелектричні елементи (DSSCs), фотоелектрохімічні фотоелектричні елементи, а також полімерні та органічні фотоелектричні пристрої (OPVDs).

Для сонячних елементів на основі квантових точок ККД знаходиться у проміжку 11-17%. Їх переваги є низька собівартість виробництва та енергоспоживання, проте вони мають суттєвий недолік – високу токсичність для навколишнього середовища [1,2].

Сонячні елементи на основі органічних і полімерних фотоелектричних елементів. Для них ККД становить 9-11%. Переваги – низька вартість обробки, невелика вага, гнучкість та термічна стабільність. Проте, вони мають невисоку ефективність.

Сонячні елементи на основі перовскіту мають ККД 21%, недорога та проста конструкція, легка вага, висока ефективність та низька вартість є суттєвими їх перевагами, проте є недоліки – низька стабільність [1,2].

Багатоперехідні сонячні елементи мають ККД 36%. Вони мають дуже велику продуктивність, що є найвищим показником для сонячних елементів третього покоління. На жаль, є і недоліки – дуже складна будова та висока вартість [2].

Основним напрямком досліджень з великим потенціалом для розвитку є сонячні елементи середнього діапазону (IBSC). Вони являють собою концепцію сонячних батарей третього покоління і включають в себе не тільки кремній, а й інші матеріали. Ідея концепції сонячної батареї полягає в поглинанні фотонів з енергією, що відповідає ширині піддіапазону в структурі комірки. IBSC шари кремнію імплантуються з дуже високими дозами іонів металів для створення додаткового енергетичного рівня [2].

Фотоелектричні елементи четвертого покоління також відомі як гібридні неорганічні елементи, оскільки вони поєднують низьку вартість і гнучкість полімерних тонких плівок зі стабільністю органічних наноструктур, таких як наночастинки металів і оксиди металів, вуглецеві нанотрубки, графен та їх похідні. Ці пристрої, які часто називають «нанофотовольтаїкою», можуть стати перспективним майбутнім фотовольтаїки.

Особливий акцент було зроблено на фотоелектричних елементах на основі графену, оскільки він вважається наноматеріалом майбутнього. Завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока рухливість носія, низький питомий опір і коефіцієнт пропускання, а також 2D-гратчасте покриття, матеріали на основі графену розглядаються для використання в фотоелектричних пристроях замість існуючих звичайних матеріалів. Виділяють кілька типів сонячних елементів на основі графену, включаючи елементи органічного об'ємного гетеропереходу (ВНІ), чутливі до барвника елементи та перовскітні елементи. Ефективність перетворення енергії перевищила 20,3% для перовскітних сонячних елементів на основі графену та досягла 10% для органічних сонячних елементів ВНІ. На додаток до своєї функції вилучення та транспортування заряду до електродів, графен відіграє ще одну унікальну роль — він захищає пристрій від деградації навколишнього середовища завдяки своїй упакованій

2D-гратчастій структурі та забезпечує довгострокову екологічну стабільність фотоелектричних пристроїв. Основним недоліком графену є його низька гідрофільність, що негативно впливає на конструкцію пристроїв, оброблених у розчині, але цей факт може бути подоланий шляхом модифікації поверхні шляхом нековалентної хімічної функціоналізації. Враховуючи механічну міцність і гнучкість графену, а також його чудові властивості провідності, можна передбачити, що незабаром з'являться нові застосування в пластиковій електроніці та оптоелектроніці, пов'язані з цим новим класом CVD графенових матеріалів. Це відкриття відкриває шлях для недорогих шарів графену для заміни ІТО у фотоелектричних та електролюмінесцентних пристроях [2].

Вуглецеві нанотрубки для сонячних батарей є ідеальними наноматеріалами для селективного переносу та для збору шарів у сонячних елементах завдяки своїм винятковим фотонним, електричним та механічним можливостям. Основним елементом є верхній електрод в якості прозорого провідного шару, виготовлений з оксид олова та індію. Перевага ІТО полягає в його чудовій прозорості та провідності. Однак ця речовина містить індію – рідкісний метал. Іншими недоліками є низька гнучкість, велика кількість кристалічних дефектів, висока вартість та нестабільність за високих температур. Всі ці фактори впливають на масовість використання цих матеріалів. У результаті сонячні елементи без індію стали основною метою досліджень для фотогальванічних технологій наступного покоління. Завдяки своїм унікальним властивостям вуглецеві нанотрубки стали перспективною безіндієвою альтернативою для використання як прозорі та провідні матеріали [3].

Таким чином, фотоелектричні технології постійно розвивається, демонструючи перехід від традиційних кремнієвих елементів до складних багатоперехідних і наноструктурованих систем, здатних кардинально підвищити ККД і розширити сфери застосування сонячної енергії. Впровадження нових рішень, створення нових та удосконалення старих фотоелектричних матеріалів відкривають шлях до створення більш доступних, гнучких, прозорих та довговічних елементів, що підвищить конкурентоспроможність сонячної енергетики нового покоління.

Список літератури:

1. Ogundipe O.B. Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and Applications / O.B. Ogundipe, A.C. Okwandu, S.A. Abdulwaheed // GSC Advanced Research and Reviews. – 2024. – 20(01). – P. 159–175.
2. Pastuszak J. Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development / J. Pastuszak, P. Węgierek // Materials. – 2022. – 15(16). – 5542.
3. Wang L. A holistic and state-of-the-art review of nanotechnology in solar cells / L. Wang, M.P.R. Teles, A. Arabkoohsar, H. Yu, K.A.R. Ismail, O. Mahian, S. Wongwises // Sustainable energy technologies and assessments. – 2022. – 54. – 102864.

УДК: 621.311.243

ПОРІВНЯННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ PVT КОЛЕКТОРІВ

Зайцев 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.

Сонячне випромінювання, яке надходить на поверхню фотоелектричного модуля, лише частково перетворюється в електроенергію, тоді як значна частина поглинутої радіації втрачається у вигляді теплової енергії в оточуюче середовище. Фотоелектричні теплові (PVT) колектори, поєднуючи технологій фотоелектричної генерації з тепловим сонячним колектором, дозволяють відводити надлишкову теплоту фотоелектричного модуля до теплоносія, підвищуючи тим самим ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Таким чином, PVT колектори одночасно генерують тепло та електрику, що дозволяє досягти загальних ефективностей перетворення сонячного випромінювання вищих за ефективність окремо працюючих фотоелектричних та теплових перетворювачів. За конструкцією колектори діляться на непокриті, покриті, вакуумовані, концентруючі, а за типом теплоносія, що використовується для охолодження фотоелектричних перетворювачів – на колектори з рідинним та повітряним охолодженням [1]. Конструктивні параметри, режими використання та кліматичні умови місця розташування будуть значним чином впливати на теплову та електричну продуктивності PVT колекторів, а, отже, визначати напрямки їх застосування.

В даній роботі проводиться порівняння теплової та електричної продуктивностей фотоелектричних теплових колекторів найбільш поширених конструкцій: непокритого, покритого та покритого з низькоемісійним покриттям (low-E).

Теплопродуктивність PVT колекторів описується характеристичною кривою, що є залежністю питомого миттєвого вироблення теплової енергії від прямого G_b і розсіяного G_d випромінювання, температури теплоносія в колекторі T_m , температури оточуючого середовища T_a , швидкості вітру u та теплового радіаційного теплообміну $(E_L - \sigma T_a^4)$ [1, 2]:

$$q_{th} = \eta_{th,0}(K_{\theta b}(\theta)G_b + K_{\theta d}(\theta)G_d) - c_1(T_m - T_a) - c_2(T_m - T_a)^2 - c_3u(T_m - T_a) + c_4(E_L - \sigma T_a^4) - c_5 \frac{dT_m}{dt} - c_6uG, \quad (1)$$

де $\eta_{th,0}$ – оптичний ККД сонячного колектора (максимальна теплова ефективність); $K_{\theta b}(\theta), K_{\theta d}(\theta)$ – модифікатори кутів падіння для прямої та дифузної радіації; c_1 – лінійний коефіцієнт тепловтрат, Вт/(м²·К); c_2 – квадратичний коефіцієнт тепловтрат, Вт/(м²·К²); c_3 – залежність коефіцієнта тепловтрат від швидкості вітру, Вт·с/(м³·К); c_4 – вплив довгохвильового радіаційного теплообміну; c_5 – ефективна теплоємність колектора, Вт·с/(м²·К);

c_6 – залежність максимальної теплової ефективності від швидкості вітру, с/м.

Ця модель є універсальною для всіх теплових та PVT колекторів із замкненим контуром, при цьому параметри колекторів визначаються на основі квазідинамічних випробувань. Коефіцієнти $\eta_{th,0}$ та c_1 – c_6 оцінюються за допомогою багатолінійної регресії із зовнішньої характеристики колектора. Залежно від технології колекторів, деякі з коефіцієнтів c_1 – c_6 можуть виявляти незначну чутливість і тому можуть дорівнювати нулю.

Миттєва питома вихідна електрична потужність p_{el} , Вт/м²:

$$p_{el} = \eta_{el,STC} \cdot PR_{tot} \cdot G, \quad (2)$$

де $\eta_{el,STC}$ – ККД фотоелектричного модуля, визначене для умов STC; PR_{tot} – загальний миттєвий коефіцієнт ефективності:

$$PR_{tot} = PR_{IAM} \cdot PR_T \cdot PR_G. \quad (3)$$

Миттєвий коефіцієнт продуктивності PR_{IAM} враховує втрати через зміну кута падіння сонячної радіації θ :

$$PR_{IAM} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right). \quad (4)$$

Для фотоелектричних модулів типове значення параметра b_0 становить 0,07.

Коефіцієнт, що враховує температурну залежність електричного ККД, визначається за формулою:

$$PR_T = 1 - \gamma(T_{cell} - 298,15K), \quad (5)$$

де γ – температурний коефіцієнт потужності фотоелектричних модулів, %/K; T_{cell} – температура фотоелектричного елемента, яка в PVT колекторах розраховується на основі еквівалентної теплової мережі, що з'єднує фотоелектричні перетворювачі T_{cell} і теплоносії T_m і характеризується коефіцієнтом теплопередачі $U_{AbsFluid}$:

$$T_{cell} = T_m + \frac{q_{th}}{U_{AbsFluid}}. \quad (6)$$

Внутрішній коефіцієнт теплопередачі $U_{AbsFluid}$ описує теплове з'єднання фотоелектричного модуля із теплоносієм.

Коефіцієнт, що враховує зниження ефективності перетворення сонячного випромінювання при зменшенні сонячної радіації, що надходить на поверхню фотоелектричного модуля:

$$PR_G = aG + b \ln(G + 1) + c \left[\frac{(\ln(G + e))^2}{G + 1} - 1 \right], \quad (7)$$

де G – надходження сонячної радіації, Вт/м²; e – число Ейлера.

Типовими значеннями для кристалічних фотоелектричних модулів є $a = -0,0000109$ м²/Вт, $b = -0,047$ і $c = -1,40$.

Розрахунок вироблення теплової та електричної енергії PVT колекторами (рис. 1) проводився помісячно для кліматичних умов півдня України з використанням середньомісячних значень температури повітря, швидкості вітру та для усереднених значень надходження сонячної радіації та кута падіння випромінювання для характерних днів місяців. Приймалося, що

поверхня колекторів має південну орієнтацію та кут нахилу 45° . Для порівняння також наведено генерацію фотоелектричних модулів.

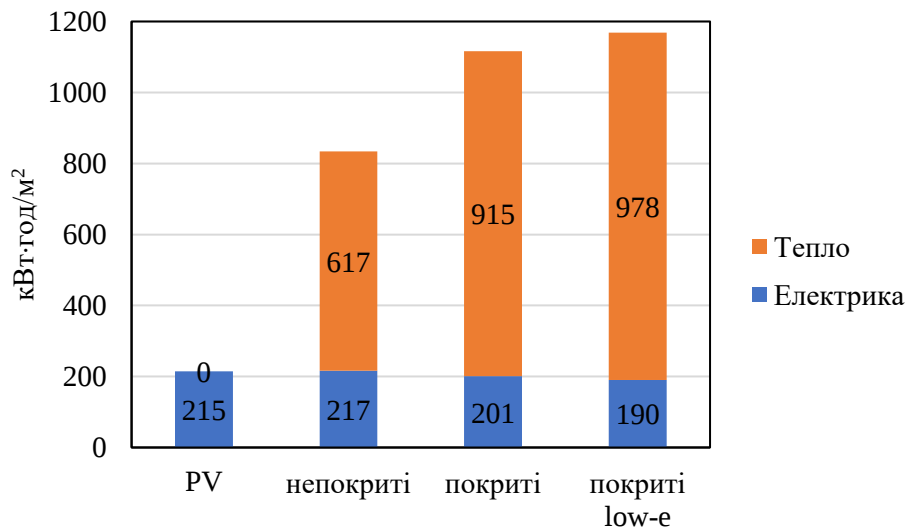


Рисунок 1 – Продуктивність PVT колекторів

Оскільки конструкція непокритих PVT колекторів не передбачає світлопрозорого покриття на певній відстані від фотоелектричного перетворювача, то такі колектори мають збільшені тепловтрати у порівнянні з покритими. Це створює кращі умови для охолодження фотоелектричних перетворювачів, а, отже, підвищує ефективність генерації електричної енергії.

Непокритий PVT колектор також має переваги щодо вироблення електричної енергії у порівнянні з фотоелектричним модулем (PV). Розрахунки показують, що охолодження фотоелектричних перетворювачів у складі колектора дає зниження їх робочої температури в середньому за рік на 3°C , а влітку – на 13°C .

Порівняння покритих PVT колекторів показує, що застосування низькоемісійного шару на світлопрозорому покритті підвищує теплову продуктивність колектора на 7%, але знижує генерацію електроенергії на 5,4% в середньому за рік.

В цілому, застосування непокритих PVT колекторів дає переваги при виробленні електричної енергії, а покритих – для застосувань, що потребують більшої кількості теплової енергії.

Список літератури:

1. Zenhäusern D. PVT Wrap-Up. Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors / D. Zenhäusern, E. Bamberger, A. Baggenstos [Electronic resource]. – Access mode: https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/spf/forschung/projekte/pvt_wrapup_final_en.pdf – Title from the screen.
2. Jonas D. Performance modeling of PVT collectors: Implementation, validation and parameter identification approach using TRNSYS / D. Jonas, M. Lämmle, D. Theisc, S. Schneider, G. Frey // Solar Energy. – 2019. – 193. – P.51-64.

УДК 621.039: 533.6

ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Смоковський М.В.¹, к.т.н., доц. Чорна Н.А.^{1, 2}

¹Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», м. Харків

²Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України,
м. Харків

nataliyachernaya7@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Чорна Н.А.

В наш час зростаюча потреба в скороченні викидів парникових газів і залежність від викопного палива активізували пошук альтернативних джерел енергії. Водень з його високими густиною енергії і потенціалом для виробництва енергії без викидів є багатообіцяючим кандидатом. Його універсальність забезпечує можливості застосування в багатьох секторах, включаючи транспорт, промисловість і виробництво електричної енергії [1]. Дослідження водневої енергетики датуються початком 19 століття з відкриттям електролізу води. У 20 столітті відбувся значний прогрес, особливо на початку освоєння космосу, коли водневі паливні елементи приводили в дію космічні кораблі. В останні десятиріччя відновлення інтересу до водню пов'язане з гострою необхідністю пом'якшення кліматичних змін. На рис. 1 показано хронологію розвитку водневої енергетики [2].

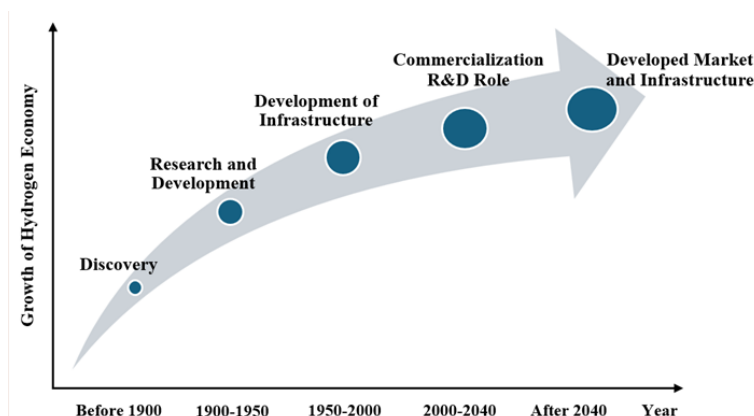


Рисунок 1 – Хронологія розвитку водневої енергетики

Хронологія висвітлює ключові фази в еволюції водневої енергетики. Фаза відкриттів до 1900 року заклала фундаментальне усвідомлення людством того, що водень є потенційним джерелом енергії. Після цього настав період інтенсивних досліджень і розробок приблизно з 1900 по 1950 рік, протягом якого вчені та інженери досліджували фундаментальні властивості та потенційні можливості застосування водню. Друга половина 20-го століття характеризується значними кроками в розвитку інфраструктури виробництва,

зберігання та розподілу водню, створюючи основу для більш широкого його використання у якості джерела енергії. Починаючи з 2000-х років і приблизно до 2040-х зусилля з комерціалізації та науково-дослідних розробок переважно зосереджені на вдосконаленні водневих технологій, щоб зробити їх більш ефективними та рентабельними. У цей період активно запроваджується інтеграція водню в різноманітні промислові та транспортні програми. Майбутня фаза, після 2040-х років, передбачає повністю розвинений ринок водню та інфраструктуру, що дозволить широко використовувати водень як основне джерело енергії. Наведений на рис. 1 графік підкреслює безперервний прогрес і зростаючу важливість водню в глобальному енергетичному ландшафті, підкреслюючи його потенціал відігравати вирішальну роль у досягненні цілей сталого розвитку енергії та скороченні викидів вуглецю в усьому світі.

Для отримання водню використовують ряд основних методів, кожен із яких характеризується як певними перевагами, так і проблемами, що потребують розв'язання.

Для широкого використання водню у якості альтернативного джерела енергії критично важливими є його ефективне зберігання (акумуляування) і розподіл. Серед основних способів акумуляування водню розрізняють зберігання у стисненому газоподібному стані, в рідкому стані та в твердотільних пристроях на основі гідридів металів. Кожен з цих способів характеризується певними унікальними перевагами і технологічними особливостями. Акумуляування у стані стисненого газу є найбільш простим способом, але супроводжується високим тиском. Рідкий водень забезпечує вищу густину енергії, але потребує надзвичайно низьких температур. Металогідридне акумуляування водню є найбільш безпечним, але характеризується найменшою питомою вагою [3].

Воднева енергетика має різноманітне застосування в різних секторах економіки. Застосування водневої енергії, підкреслюючи її переваги і поточний стан показано в табл. 1.

Таблиця 1

Застосування водневої енергії і її переваги [4, 5]

Застосування	Переваги	Поточний стан
Паливні елементи	Висока ефективність, низькі викиди	Комерційно доступні
Промислове застосування	Більш чисті виробничі процеси	Широко використовується
Транспорт	Нульові викиди, висока густина енергії	На етапі розвинення і зниження собівартості
Виробництво електроенергії	Гнучке, ефективне, підтримує поновлювані джерела енергії	На етапі від експериментального до комерційного

При обговоренні перспектив водневих технологій в автономних енергосистемах на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) основна увага

приділяється вирішенню проблем нестабільності ВДЕ шляхом інтеграції технологій електролізу, металогібридного акумулювання водню та використання паливних елементів. Ці технології підвищують надійність енергопостачання, особливо у віддалених районах.

Акцент зроблено на ефективних низькотемпературних паливних елементах (1–20 кВт) та безпечних металогібридних акумуляторах. Енергетичні системи, що містять такі пристрої, дозволяють зменшити екологічне навантаження і виключити необхідність використання компресорів завдяки умовам акумулювання водню за високих тисків [6].

Для здійснення оптимального вибіру гібридних матеріалів з метою використання в металогібридних системах потрібно визначати конструктивні параметри основних елементів та режимні параметри їх роботи [7].

Таким чином, ключовою метою пропонованого дослідження є розробка енергосистеми, що ґрунтується на відновлюваних джерелах енергії, з метою забезпечення основних потреб житлових районів, таких як подача електроенергії. Для забезпечення стійкого і безперервного виробництва енергії, металогібридні системи зберігання водню паливні елементи інтегруються з ВДЕ.

Список літератури:

1. Zhang L. A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies / L. Zhang, C. Jia, F. Bai, W. Wang, S. An, K. Zhao, Z. Li, J. Li, H. Sun // Fuel. – 2024. – Vol. 355. – 129455.
2. Goodarzi N. Recent progress on semiconductor heterogeneous photocatalysts in clean energy production and environmental remediation / N. Goodarzi, Z. Ashrafi-Peyman, E. Khani, A.Z. Moshfegh // Catalysts. – 2023. – 13(7). – 1102.
3. Avramenko A.M. Application of highly efficient hydrogen generation and storage systems for autonomous energy supply / A.M. Avramenko, A.A. Shevchenko, N.A. Chorna, A.L. Kotenko // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – №. 3. – P. 69-74.
4. Tellez-Cruz M.M. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): Advances and challenges / M.M. Tellez-Cruz, J. Escorihuela, O. Solorza-Feria, V. Compañ // Polymers. – 2021. – 13(18). – 3064.
5. Yu S. Hydrogen-based combined heat and power systems: A review of technologies and challenges / S. Yu, Y. Fan, Z. Shi, J. Li, X. Zhao, T. Zhang, Z. Chang // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – 48(89). – P. 34906-34929.
6. Matsevytyi Y.M. Development of a Perspective Metal-Hydride Energy Accumulation System Based on Fuel Cells for Wind Energetics / Y.M. Matsevytyi, N.A. Chorna, A.A. Shevchenko // Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – 22(4). – P. 48-52.
7. Chorna N.A. Application of Mathematical Modeling for the Improvement of Mass and Size Parameters of Metal-Hydride Installations / N.A. Chorna, V.V. Hanchyn // Journal of Mathematical Sciences. – 2022. – 263 (1). – P. 185-194.

УДК 621.311.2

ГІБРИДНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ СТРУКТУРИ НА ОСНОВІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Аспірант Гавриленко Я.В.

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

yasx80@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. наук. співр. Дерій В.О.

Загроза глобального потепління і курс на зменшення викиду CO_2 в атмосферу у всьому світі вимагали трансформації енергетичної галузі та переходу від використання викопного палива до впровадження відновлювальних джерел енергії. Прийняття «зеленого» тарифу на електроенергію, як основного стимулюючого фактору розвитку ВДЕ, та нормативно-правові акти минулих років сприяли будівництву нових генеруючих потужностей відновлювальної енергетики в Україні. Найдоступнішим і найпоширенішим серед них вважається сонячна енергія, що сприяло активному введенню в експлуатацію сонячних електростанцій (СЕС) в Україні також. У листопаді 2024 року глобальна світова потужність сонячних електростанцій досягла рекордних 2000 ГВт [1]. У 2024 році приріст загальносвітової потужності сонячної енергетики мав досягнути 593 ГВт [2], тільки в Європі загальна потужність СЕС збільшилась на 66 ГВт [3]. За інформацією від Голови асоціації сонячної енергетики України, в 2024 році СЕС України додала в потужності приблизно 800-850 МВт за рахунок бізнесу та домогосподарств [4].

Генерація сонячної енергетики має стохастичний характер і залежить від погодних факторів, що затрудняє її використання в базовому режимі. Ми маємо надлишок сонячної енергії влітку і дефіцит взимку, у ранішні і вечірні години максимального попиту на електроенергію сонячна генерація зазвичай не досягає свого максимуму. В години профіциту електроенергії в енергосистемі України оператор системи передачі надає команди на обмеження потужності від сонячних станцій, щоб тримати баланс між генерацією та споживанням електроенергії. Таким чином, сонячна енергія, що мала бути згенерована втрачається, а держава має платити за невідпущену електроенергію. Зростання впровадження відновлюваних джерел енергії в ЄС передбачає досягнення 42,5% відновлюваної енергетики до 2030 року, з яких 60% припадатиме на фотоелектричні системи [5]. Для подальшого збільшення частки сонячної генерації і ефективного її використання необхідно створювати енергетичні комплекси на основі СЕС, що сприятимуть розвитку сонячної енергетики в ринкових умовах.

СЕС в поєднанні з акумуляторними системами зберігання енергії (BESS). Для СЕС найбільш підходящим варіантом є акумуляторні системи накопичення та зберігання енергії (BESS), особливо для розподілених енергосистем. Популярність BESS обумовлена їх доступністю, здешевленням, високою

швидкодією та щільністю накопичення енергії, достатньою потужністю, що дозволяє застосовувати їх для регулювання частоти і потужності енергосистем. BESS дозволяє зберігати електроенергію, вироблену сонячними панелями під час пікових годин генерації, та використовувати її у періоди низької продуктивності або підвищеного попиту. Це робить BESS критично важливою для забезпечення стабільного й надійного електропостачання.

16 червня 2022 року набрав чинності Закон N 2046-IX "Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії. Закон N 2046-IX враховує основні принципи правового регулювання установок зберігання енергії в країнах ЄС та сприяє використанню цих систем, збалансує роботу енергосистеми та сприятиме синхронізації української енергосистеми з європейською ENTSO-E [6].

Енергетичний комплекс PV + BESS може забезпечувати наступні загальні потреби:

- зменшення собівартості електроенергії;
- забезпечення власного споживання;
- надання допоміжних послуг для загальної електричної мережі (такі як регулювання частоти та підтримка напруги).

СЕС в поєднанні з BESS та когенераційні установки (CHP). Наразі сезонне накопичення енергії для сонячних електростанцій практично не реалізоване. Поки таке зберігання не стане доступним, зимові енергетичні потреби можуть задовольнятися когенераційними установками. У цьому випадку когенерація слугує додатковим джерелом енергії для сонячних систем, допомагаючи власникам покривати повне споживання електроенергії.

Когенераційні установки, виробляючи електричну енергію, використовують відпрацьоване тепло, наприклад, для постачання гарячої води чи опалення споживачам, таким як фабрики чи житлові комплекси. Це дозволяє зменшити втрати до 2–25%, підвищуючи загальну енергоефективність до 75–98% [7].

На відміну від сонячної генерації, когенераційні установки незалежні від погодних умов та зовнішніх факторів, що дозволяє їм виробляти енергію відповідно до поточного попиту. Завдяки швидкому запуску та здатності оперативно генерувати електроенергію і тепло, вони можуть миттєво компенсувати нестачу енергії від енергетичного комплексу СЕС в поєднанні з BESS.

Переваги використання такого комплексу наступні:

- ефективніше використання викопного палива;
- зниження витрат на паливо та виробництво електроенергії;
- екологічність: зменшення викидів CO₂, NO_x і SO₂;
- енергетична незалежність і безпека: стабільне джерело живлення;
- утворення енергетичного децентралізованого комплексу розподіленої генерація;
- виробництво енергії безпосередньо на місці скорочує витрати на транспортування та розподіл електроенергії.

СЕС в поєднанні з BESS, CHP та тепловими насосами (НР). Такий енергетичний комплекс дозволить додатково зменшити споживання енергії для опалення та охолодження. CHP і НР вважаються ефективними рішеннями для підвищення продуктивності систем централізованого теплопостачання. Вони також слугують альтернативою традиційним моделям на основі викопного палива, які мають значний негативний вплив на довкілля.

При порівнянні цих технологій у різних секторах, когенераційні установки зазвичай виступають більш надійним вибором для енергоємних процесів, таких як промисловість, сільське господарство чи медичні установи, де потрібне стабільне постачання електроенергії та тепла.

З іншого боку, теплові насоси є оптимальним вибором для житлових будівель і невеликих комерційних об'єктів, де потреби в опаленні та охолодженні є відносно помірними та стабільними.

Впровадження розподілених гібридних систем СЕС+BESS+CHP+НР може стати важливим кроком у глобальній енергетичній трансформації. Основний акцент робиться на пошуку рішень, які сприяють зменшенню використання викопного палива та скороченню викидів CO₂, особливо у сфері виробництва тепла.

СЕС в поєднанні з BESS, електричним бойлером (ЕБ) та системою теплового зберігання енергії (TESS). Технологія електрифікації опалення, відома як "енергія для тепла" (PtH), пропонує ефективний спосіб перетворення надлишкової електроенергії з відновлюваних джерел енергії в тепло, яке легше зберігати. Перетворення надлишкової енергії від СЕС в тепло відкриває додаткові можливості та сприяє до збільшення частки відновлюваної енергії в секторі теплопостачання. Це допомагає поєднати енергетичні сектори електроенергії та тепла, водночас зменшуючи використання викопного палива.

TESS є ключовим елементом електрифікованих систем опалення, надаючи додаткову гнучкість технології PtH в рамках загальної енергетичної системи. У багатьох домівках по всьому світу промислові електричні водонагрівачі забезпечують доступ до гарячої води. Резервуари для зберігання води у таких системах слугують великими теплоакumuлюючими ємностями, що дозволяє зберігати енергію гарячої води протягом тривалого часу для подальшого використання. Електричні котли (водонагрівачі) стали одним із найпоширеніших інструментів для управління попитом, які використовуються операторами мереж.

В табл. 1 наведена сфера використання гібридних комплексів на основі сонячних електростанцій.

Таблиця 1

Гібридні структури СЕС

№	Структура	Сфера використання
1	СЕС + BESS	- функціонування на ринку ЕЕ, як виробник з прогнозованою потужністю; - активний спожива.
2	СЕС + BESS+ CHP	функціонування на ринку ЕЕ, як виробник з гарантованою потужністю;

№	Структура	Сфера використання
		використання в промисловості та сфері обслуговування.
3	CEC + BESS+ CHP + HP	використання в сховищах для зберігання охолоджених продуктів. В якості акумулятора теплової енергії використовуються самі продукти.
4	CEC + BESS + EB + TESS	перетворення надлишкової ЕЕ в теплову для її використання в системах централізованого теплопостачання (СЦТ).

Список літератури:

1. Twidale S. Exclusive: Global solar capacity hits 2 TW on path to climate goal, data shows [Electronic resource] / S. Twidale // Reuters. – 2024, Nov 7. – Access mode: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/global-solar-capacity-hits-2-tw-path-climate-goal-data-shows-2024-11-07> (last access: 12.03.2025). – Title from the screen.

2. Solar Power Continues To Surge in 2024 [Electronic resource] // DS New Energy. – 2024, Sep 29. – Access mode: <https://www.dsneg.com/news/solar-power-continues-to-surge-in-81213555.html> (last access: 12.03.2025). – Title from the screen.

3. Solar surpasses coal in 2024, marking a record year of Renewable Energy growth in the European Union [Electronic resource] // SOLIDA – Next Generation Renewables. – 2025, Feb. – Access mode: <https://solida.com.es/en/solar-power-surpasses-coal-in-2024/> (дата звернення: 12.03.2025). – Title from the screen.

4. Владислав Соколовський: “Ми вистояли, ми рухаємося вперед” [Електронний ресурс] // Асоціація сонячної енергетики України. – 10.01.2025. – Режим доступу: <https://aseu.org.ua/vladyslav-sokolovskyj-my-vystoialy-my-rukhaemosia-vpered/> (дата звернення: 12.03.2025). – Назва з екрану.

5. Які країни ЄС використовують найбільше і найменше відновлюваних джерел енергії [Електронний ресурс] // Зелена трансформація України. – 05.02.2024. – Режим доступу: <https://greentransform.org.ua/yaki-krayiny-yes-vykorystovuyut-najbilshe-i-najmenshe-vidnovlyuvanyh-dzherel-energiyi/> (дата звернення 22.03.2025). – Назва з екрану.

6. Гавриленко Я.В. Формування правових засад функціонування та розвитку «зеленої» енергетики / Я.В. Гавриленко, В.О. Дерій // Системні дослідження в енергетиці. – 2024. – 4(80). – С. 120-133. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.120>

7. Cogeneration System: Working Principles, Types & Application [Electronic resource] // Linquip. – 2023, Apr 02. – Access mode: <https://www.linquip.com/blog/cogeneration-system-working-principles-types-application/> (last access: 22.03.2025). – Title from the screen.

УДК 620.91:621.331

ІНТЕГРАЦІЯ ГРОМАДСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ДО ЕНЕРГОСИСТЕМИ НА БАЗІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ VEHICLE-TO-GRID

К.т.н., доц. Нерубацький В.П., Шаповалова Д.С.

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків

NVP9@i.ua; dashashapovalova2017@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Нерубацький В.П.

Питання переходу до сталої енергетики та зменшення залежності від викопного палива набуває особливої актуальності в умовах змін клімату, зростання вартості енергоносіїв і геополітичної нестабільності у світі. Одним із ключових напрямів такої трансформації є активне впровадження відновлюваних джерел енергії та електрифікація транспортного сектору, зокрема розвиток громадського електротранспорту. З переходом до сталих моделей енергоспоживання стає очевидним, що саме електрифікація транспорту може відігравати вирішальну роль у скороченні викидів та зменшенні навантаження на традиційні енергетичні мережі.

Водночас широке використання відновлюваних джерел енергії супроводжується зростанням нестабільності енергетичних систем через залежність генерації від погодних умов. Ця проблема, однак, може бути ефективно вирішена за допомогою гнучких механізмів балансування енергії, серед яких особливу увагу привертає використання концепції Vehicle-to-Grid – технології двостороннього обміну енергією між транспортними засобами з електроприводом і мережею [1, 2]. Застосування цієї технології може стати важливою ланкою для стабілізації роботи енергосистем, а громадський електротранспорт, який є важливим компонентом міської інфраструктури, стає ключовим елементом для її інтеграції в енергомережу нового покоління.

В умовах міського середовища електробуси, трамваї та тролейбуси, оснащені акумуляторами та підключені до відповідної інфраструктури, можуть не лише споживати енергію, а й акумулювати її в години надлишкової генерації з відновлювальних джерел енергії та віддавати назад у мережу у години пікового споживання [3, 4]. Завдяки чітким графікам руху та тривалим стоянкам на кінцевих зупинках або у депо, громадський електротранспорт ідеально підходить для реалізації концепції Vehicle-to-Grid у міських умовах, де є потреба в ефективному використанні енергетичних ресурсів.

Впровадження такої системи дозволяє вирішити одразу кілька актуальних завдань: підвищити гнучкість роботи енергосистеми, знизити навантаження на основну мережу, скоротити витрати на балансування енергії, зменшити кількість необхідних стаціонарних акумулюючих систем і зробити електротранспорт елементом смарт-мереж нового покоління. Це також створює основу для розвитку нових бізнес-моделей та інноваційних рішень у сфері енергетики, орієнтуючи міста на більш сталий розвиток і екологічну

ефективність.

Результати моделювання, проведені на прикладі умовного міста із значним електробусним парком, демонструють, що потреба в електроенергії міської енергосистеми може бути частково покрита за рахунок енергії, зворотно поданої з транспортних акумуляторів під час пікових навантажень. Таке рішення можливо реалізувати за умови використання зарядних станцій, що живляться від сонячних електростанцій, встановлених на дахах депо або вбудованих у міську інфраструктуру, що дозволяє значно зменшити витрати на енергопостачання та підвищити енергоефективність.

Міжнародний досвід також свідчить про ефективність цієї концепції. У Японії після аварії на АЕС "Фукусіма" активно розвиваються мікромережі з технологією Vehicle-to-Grid, які забезпечують не лише аварійне енергоживлення, а й допоміжні послуги з балансування. У Нідерландах пілотні проекти із залученням електробусів довели економічну доцільність двостороннього обміну енергією між транспортом і мережею, а в США комерційні оператори впроваджують Vehicle-to-Grid як частину стратегії децентралізованої енергетики. Цей досвід підтверджує не лише технічну життєздатність технології, а й її економічну корисність для міст, що прагнуть до сталого розвитку.

Технічна реалізація таких рішень вимагає впровадження інтелектуальних систем керування, прогнозування попиту та генерації, високотехнологічних зарядних станцій з функцією двосторонньої передачі енергії, а також цифрових платформ моніторингу та кіберзахисту. Для забезпечення повної ефективності таких систем необхідна також адаптація нормативно-правового поля, яке має регламентувати доступ транспорту до енергоринку, умови продажу електроенергії з акумуляторів та порядок взаємодії з операторами мереж.

З економічної точки зору, впровадження технології Vehicle-to-Grid дозволяє оптимізувати витрати на енергоспоживання та зменшити загальну собівартість експлуатації електротранспорту. Транспортні підприємства можуть отримувати дохід, продаючи надлишкову енергію назад в мережу, що створює нові джерела фінансування для оновлення рухомого складу та інфраструктури. Зменшення пікових навантажень дозволяє уникнути додаткових витрат на будівництво нових генеруючих потужностей.

Соціальний ефект полягає у зменшенні забруднення повітря в містах, зниженні шуму, покращенні якості життя та створенні нових робочих місць. Крім того, впровадження Vehicle-to-Grid сприяє розвитку інноваційного середовища через взаємодію промисловості, IT-сфери та енергетики.

У підсумку можна зробити висновок, що інтелектуальна інтеграція громадського електротранспорту в енергосистему з використанням відновлювальних джерел енергії та технології Vehicle-to-Grid є одним із найперспективніших напрямів енергетичної трансформації сучасних міст. Поєднання електротранспорту з Vehicle-to-Grid не лише змінює уявлення про функціональність транспорту, а й перетворює його на активний елемент енергетичної інфраструктури. Такий підхід дозволяє гнучко управляти споживанням і виробництвом енергії, ефективно розподіляти навантаження в

енергомережах, зменшувати втрати та підвищувати загальний рівень стабільності електропостачання. Водночас технологія відкриває нові можливості для монетизації енергетичних надлишків, що генеруються під час експлуатації електротранспорту, створюючи економічну мотивацію для її широкого впровадження.

Отже, запровадження таких систем є основою для створення нової моделі міської енергетики – децентралізованої, стійкої до зовнішніх викликів, екологічно збалансованої та орієнтованої на майбутнє. Ця модель дозволяє містам не лише зменшити залежність від централізованого енергопостачання, а й активно впливати на формування енергетичної політики, базуючись на власних ресурсах і можливостях.

Для України впровадження подібних систем може стати не лише технічним або екологічним проривом, а й стратегічним кроком до енергетичної незалежності держави. З огляду на геополітичні виклики та потребу в зниженні імпорту енергоносіїв, розвиток власної, гнучкої та екологічно орієнтованої енергосистеми стає критично важливим. Реалізація рішення Vehicle-to-Grid дозволить значно скоротити викиди парникових газів, поліпшити якість повітря в містах і досягти відповідності європейським екологічним стандартам. Особливо перспективним є створення пілотних проєктів у таких великих містах, як Київ, Харків, Львів, де вже існує потужна транспортна інфраструктура та зацікавленість у модернізації. Завдяки наявній інфраструктурі ці міста можуть стати своєрідними лабораторіями енергетичних інновацій, на основі яких буде можливе масштабування Vehicle-to-Grid по всій країні з врахуванням регіональних особливостей та потенціалу.

Список літератури:

1. Biswas P. Vehicle to Grid: technology, charging station, power transmission, communication standards, techno-economic analysis, challenges, and recommendations / P. Biswas, A. Rashid, A.K.M.A. Habib, M. Mahmud, S.M.A. Motakabber, S. Hossain, M. Rokonzaman, A.H. Molla, Z. Harun, M.M.H. Khan, W.H. Cheng, T.M.T. Lei // *World Electric Vehicle Journal*. – 2025. – Vol. 16, Iss. 3. – 142.
2. Mojumder M.R.H. Electric Vehicle-to-Grid (V2G) technologies: impact on the power grid and battery / M.R.H. Mojumder, F.A. Antara, M. Hasanuzzaman, B. Alamri, M. Alsharef // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, Iss. 21. – 13856.
3. Comi A. Challenges for implementing Vehicle-to-Grid services in parking lots: A state of the art / A. Comi, E. Elnour // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, Iss. 24. – 6240.
4. Нерубацький В.П. Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів / В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, А.В. Машура, Д.А. Гордієнко // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2019. – Том 24, № 6. – С. 11–19.

UDC 621.311.243

IMPLEMENTATION OF FLOATING SOLAR POWER PLANTS ON WATER BODIES

Chepurko A.O., Feshchenko D.O., Beshynskyi M.I.

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

anastasiia110105@gmail.com

Scientific advisor: senior lecturer Maslova T. B.

Introduction. Today, global warming is the main problem of humanity, caused by the burning of fossil energy sources such as coal, oil and natural gas. The use of alternative energy sources is viewed as the main solution to this problem. One of the most effective solutions is floating solar power plants, which not only generate clean electricity but also contribute to the conservation of water resources. It also reduces water evaporation, which is important in the context of climate change and freshwater shortages [1]. Thus, floating solar power plants simultaneously solve two critical problems: reducing greenhouse gas emissions and rational use of water resources.

Objective. This article discusses the practicality of installing solar power plants on water surfaces, considers the components of floating solar systems, and analyses their environmental impact as well as prospects for future use.

Methods. A floating solar power plant includes components such as the solar module, anti-corrosion materials, vertical and horizontal frames, a buoyant body, an inspection footrest, and a module mounting system. The solar module must be highly resistant to humidity, dustproof, free from lead, and effectively shielded from water exposure. The buoyant component, made of polyethylene, is designed to support up to 2.5 times its weight. The floating structure is coated with a magnesium alloy, offering unique resistance to corrosion [2]. The photovoltaic modules are close to the water surface, which favours their efficient cooling by means of water circulation and the cooling effect of wind gusts. This cooling mechanism significantly reduces the temperature of the modules, ensuring optimum performance and durability [3]. Research in this area has shown that energy production is improved by 3-6% compared to conventional photo electric panels, and even if the water temperature is higher than the air temperature, it has a positive effect [4].

In terms of environmental impact, floating solar power plants built on bodies of water that are not in use are an innovative step towards a greener future. Firstly, this approach saves land, especially in densely populated countries. Secondly, it saves water as this particular design reduces water evaporation by 70%. For example, the floating solar project on the Banasura Sagar reservoir in India saves about 9 million litres of water per year [5].

Despite all the advantages, there are also negative environmental factors, however. The presence of floating solar panels is expected to change the surface temperature of the water body, and this can lead to negative consequences for aquatic species which are sensitive to temperature changes. Another important consideration

is the construction process itself, as it causes underwater noise to increase by up to 20 decibels. This will certainly adversely affect species that use sounds for survival. Thus, it is essential to consider all possible impacts so that floating solar farms could remain environmentally friendly [5].

Results. We should take into account the international experience of using the technology of floating solar power plants. In fact, floating solar power plants are being actively implemented around the world as an efficient source of renewable energy. In particular, in India, projects of this type are being implemented at the national level. One of the most famous ones is a 126 MW floating power plant on the Omkareshwar reservoir, which provides more than 200 thousand MWh of electricity annually and helps reduce CO₂ emissions by almost 174 thousand tonnes. At the same time, the plant contributes to the conservation of water resources by reducing evaporation [6]. In Europe, an example of successful implementation is Austria, where Baywa r.e. is actively installing solar panels on artificial reservoirs formed after mining. This approach makes it possible to effectively use areas unsuitable for agriculture or construction, while ensuring sustainable production of clean energy [7].

Conclusion. In conclusion, floating solar power plants represent a promising solution that combines the efficient production of clean energy and the solution to the problem of global warming. In practice, floating solar power plants reduce water evaporation, lower the temperature of water bodies, and suppress the growth of harmful algae. There are all reasons to believe that further investigation of their environmental impact and better improvement of their energy efficiency will ensure a clean and sustainable energy future.

References:

1. Bennett P. Floating Solar Panels Could Power Thousands of Cities Entirely, New Study Finds. EcoWatch. March 15, 2023. URL: <https://www.ecowatch.com/floating-solar-panels-cities.html>.
2. Floating Solar Panels System. DS New Energy. February 25, 2022. URL: <https://www.dsnerg.com/info/floating-solar-panels-67020202.html>.
3. Huang G. A Comprehensive Review of Floating Solar Plants and Potentials for Offshore Applications / G. Huang, Y. Tang, X. Chen, M. Chen, Y. Jiang // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, No. 11. – 2064.
4. Manolache A.I. Offshore Renewables for a Transition to a Low Carbon Society: An Evaluation of the Efficiency of the Floating Solar Panels in the Western Black Sea and the Razim-Sinoe Lagunar System / A.I. Manolache, G. Andrei, L. Rusu // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, No. 1. – 203.
5. The Environmental Impacts and Benefits of Floating Solar Farms. Tamesol. February 26, 2024. URL: <https://tamesol.com/floating-solar-farm/>.
6. Floating Solar Panels: Powering Sustainability from Water Bodies. Tata Power. 2024. URL: <https://www.tatapower.com/blogs/floating-solar-panels-powering-sustainability-from-water-bodies>.
7. Floating Solar Power Plants. Forbes Ukraine. August 8, 2023. URL: <https://forbes.ua/innovations/plavuchi-sonyachni-elektrostantsii-07082023-15284>.

УДК 621.311.21:697(045)

СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Апостол Я.А., Олименко І.О., ас. Беднарська І.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

aaroslav98@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

У сучасних умовах значного зростання цін на енергоносії, нестабільності постачання ресурсів та зростання обсягів викидів парникових газів, питання енергоефективності та переходу на відновлювані джерела енергії набувають особливої актуальності. Одним з ефективних способів вирішення цих проблем є використання малих гідроелектростанцій (МГЕС), які дозволяють отримувати електроенергію з природного ресурсу – річки, без шкідливого впливу на довкілля. При цьому такі системи можуть ефективно поєднуватися з автономними системами опалення та вентиляції, формуючи цілісний енергонезалежний кластер для окремої будівлі або навіть невеликого поселення.

Основною метою даної роботи є проектування системи опалення та вентиляції на основі енергії, що виробляється МГЕС. Це включає визначення відповідних технологічних параметрів, аналіз сучасних систем, екологічну та економічну оцінку, а також пропозиції щодо інтеграції таких рішень у реальні об'єкти. Запропонована система є перспективною для сільських населених пунктів, гірських регіонів, туристичних баз та інших об'єктів, де централізоване енергопостачання є проблематичним або дорогим [1].

Сучасні системи опалення і вентиляції еволюціонували у бік зменшення енергоспоживання. Основні рішення включають використання багатошарової теплоізоляції, енергоощадних вікон, теплих підлог з водяним обігрівом, теплових насосів, розумного керування мікрокліматом, а також рекуперацію тепла. Рекуперація дозволяє повертати до 70–90% тепла від витяжного повітря, зменшуючи потребу в додатковому обігріві. Застосування автоматики з датчиками вологості та температури дозволяє точно підтримувати необхідні параметри комфорту [2].

У міжнародному контексті гідроенергетика вже давно посідає провідні позиції серед ВДЕ. Наприклад, у Норвегії понад 98% електроенергії генерується завдяки гідроресурсам, у Швейцарії — близько 60%. У цих країнах активно використовуються саме малі та середні гідроелектростанції, які мають незначний вплив на екосистему та здатні забезпечити енергією віддалені населені пункти. Україна також має значний потенціал: понад 60 тисяч км річок, з яких близько 30% придатні для будівництва малих ГЕС. Однак через брак інвестицій, недосконалість законодавства та недостатню інформаційну підтримку наразі реалізовано лише 10% потенціалу [3].

У межах дослідження було проведено розрахунки потужності типової МГЕС: при висоті падіння води 4 м, витраті 3 м³/с та ККД 85% – вихідна електрична потужність становить близько 100 кВт. Цього достатньо для забезпечення електроенергією декількох будинків або одного об'єкта з підвищеним споживанням. Розрахунки споживання: система опалення – 990 Вт, вентиляція – 500 Вт. Після впровадження рекуперації вентиляції потреба знижується до 150 Вт. Загальне навантаження системи становить 1140 Вт, тобто лише 1,14% від потужності МГЕС, що дає можливість використання надлишкової енергії для інших цілей (освітлення, заряд акумуляторів тощо).

Графік тепловтрат показує, що залежність між різницею температур і втратами тепла є майже лінійною. Це свідчить про важливість високоякісної теплоізоляції та можливість економії енергії завдяки пасивному збереженню тепла. Також було змодельовано енергетичний баланс з урахуванням сезонних коливань температури та витрат. За результатами моделювання, система здатна функціонувати стабільно навіть за умов мінусових температур, забезпечуючи комфортні умови в приміщеннях.

Економічна оцінка показала, що початкові інвестиції в розмірі 500 тис. грн окупаються за 4,17 року при щорічній економії 120 тис. грн. Ураховуючи зростання тарифів, інфляцію та можливість державного фінансування (наприклад, «зелені» кредити), строк окупності може бути ще меншим. Також варто врахувати екологічні переваги – зменшення викидів CO₂, підвищення енергетичної незалежності регіону, зменшення навантаження на електромережу.

На завершення, варто зазначити, що подібні системи можуть стати основою для створення енергоефективних будівель майбутнього. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на автоматичне керування розподілом енергії, використання акумуляторних систем для збереження надлишків електроенергії, а також адаптацію обладнання до різних географічних умов. З урахуванням викликів часу, інтеграція МГЕС із системами будівель – це крок до сталого, безпечного і незалежного енергетичного майбутнього України.

Значним фактором ефективності є не лише виробництво, але й грамотне споживання енергії. Інтелектуальні системи керування дозволяють адаптувати роботу системи до режиму присутності мешканців, часу доби, погодних умов. Наприклад, зменшення потужності обігріву вночі або при відсутності людей дозволяє знизити витрати без втрати комфорту. Ці функції можуть реалізовуватись за допомогою програмованих термостатів, датчиків руху, вологомірів і температурних датчиків, об'єднаних у загальну систему «розумного будинку».

Ще одним важливим напрямом є застосування акумуляторних систем для зберігання надлишкової електроенергії, виробленої МГЕС у періоди низького споживання. Це дозволяє забезпечити стабільність у нічний час або при зниженні витрати води. Акумулятори можуть бути як хімічного типу (літій-іонні), так і механічного (гідроакумулятори). Їх ефективна інтеграція дозволяє вирішити проблему нерівномірності споживання та підвищити надійність системи.

Також доцільним є поєднання МГЕС із іншими джерелами енергії, зокрема сонячними панелями або біомасою. Така гібридна система дозволяє досягнути ще вищої автономності, а також гарантує безперебійну подачу енергії у випадку непередбачуваних змін кліматичних умов. Гібридні установки все частіше використовуються у сільському господарстві, гірських курортах та об'єктах інфраструктури.

Окремої уваги заслуговує соціально-економічний ефект впровадження МГЕС. Крім економії коштів для кінцевого споживача, такі проєкти створюють робочі місця, стимулюють розвиток місцевої інфраструктури, а також можуть стати об'єктами екологічного туризму. Таким чином, вони відіграють важливу роль у сталому розвитку регіонів.

У контексті загальної децентралізації енергетичних систем та збільшення частки ВДЕ у світовій енергетиці, малим гідроелектростанціям належить важлива роль як стабільному джерелу базового навантаження. Це особливо важливо з урахуванням того, що на відміну від сонячних чи вітрових установок, ГЕС здатні працювати цілодобово і незалежно від погодних умов. Таким чином, навіть малі ГЕС можуть забезпечити певну «енергетичну стабільність» у локальних мережах.

Список літератури:

1. Прокопчук С. Мала гідроенергетика — потужний потенціал України [Електронний ресурс] / С. Прокопчук // Урядовий кур'єр. – 2022. Режим доступу: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/mala-gidroenergetika-potuzhnij-potencial-ukrayini/>. – Назва з екрана.

2. Бондаренко В.І. Теплотехніка та основи теплопостачання: навчальний посібник / Бондаренко В.І. – Київ: КНУБА, 2017. – 186 с.

3. Малі ГЕС України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D1%96_%D0%93%D0%95%D0%A1_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8. – Назва з екрана.

Секція 4

Енергозбереження та автоматизація енергетичних процесів

УДК 621.311

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ОБСЯГУ РОБІТ З ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ

Аспірант 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. З оглядом на міжнародні зобов'язання в сфері запобігання зміни клімату, в останні роки в Україні приділяється все більше уваги енергоефективності та енергозбереженню. Так у 2021 році було прийнято Закон України «Про енергетичну ефективність» (№ 1818-IX), що транспонує більшість положень Директиви 2012/27/ЄС про енергоефективність та Регламенту (ЄС) 2017/1369.

Статті 10 «Енергетичні аудити» та 11 «Енергетичні аудитори» цього Закону визначають правові засади проведення енергетичних аудитів, а також кваліфікацію енергоаудиторів.

У червні 2024 року зміни до Закону переглянули підхід до енергоаудиту, перейшовши до моделі, що базується на енергоспоживанні. Наразі суб'єкти господарювання із середнім рівнем річного енергоспоживання в обсязі 100 тис. МВт·год на рік і вище зобов'язані проводити енергоаудит раз на чотири роки.

Оскільки промислові підприємства будуть зобов'язані проводити енергетичні аудити, це призведе до збільшення витрат на виробництво незалежно від того, чи буде аудит проводитись власними силами, або із залученням спеціалізованої аудиторської компанії.

Мета роботи – підвищення рівня обґрунтованості прийняття рішень з визначення меж обсягу робіт під час проведення енергетичного аудиту шляхом застосування математичного методу класифікації споживачів паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), що базується на використанні методу гіперсфер.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання:

1. Визначення факторів що впливають на енергетичну ефективність які встановлюються особою, що приймає рішення.

2. Розроблення математичного забезпечення визначення типових класів споживачів за енерго-економічними показниками, індикаторами та параметрами.

Об'єктом дослідження є енерго-економічні показники, індикатори та параметри споживання ПЕР промислового підприємства для встановлення меж обсягу робіт під час проведення енергетичного аудиту.

Матеріали і результати дослідження. Для визначення класів споживачів, схожих за встановленим критерієм, під час вирішення задачі визначення меж обсягу робіт з енергетичного аудиту найбільше підходять методи теорії розпізнавання образів та класифікації. Використання статистичних методів аналізу базується на припущенні про однорідність сукупності споживачів ПЕР,

що досліджується. Але реальна статистична сукупність практично завжди внутрішньо диференційована, що відповідає гіпотезі компактності класів. Ця гіпотеза дає змогу вирішити задачу розподілу сукупності споживачів ПЕР, що досліджуються, на однорідні групи (класи, кластери, таксони) за визначеними критеріями.

Пропонується вирішувати цю задачу методом гіперсфер. Метод гіперсфер належить до методів автоматичної класифікації, що дає змогу виключити особу, що приймає рішення з процесу класифікації.

Представимо споживачів паливно-енергетичних ресурсів як множину X , елементи якої задані числовими ознаками p :

$$x_j = x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp}, \quad p \geq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Класом споживачів ПЕР будемо вважати підмножину ω_i схожих між собою споживачів. За міру подібності (близькості) споживачів ПЕР використаємо величину евклідової відстані між ними d_{ij} :

$$d = \sqrt{\sum_{m=1}^p (x_{im} - x_{jm})^2}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (2)$$

Евклідова відстань є найпоширенішою мірою близькості, що використовується в задачах класифікації об'єктів. Впорядкувавши всі елементи матриці d_{ij} за зростанням, побудуємо варіаційний ряд:

$$d_{(1)} < d_{(2)} < \dots < d_{(s)}, \quad s = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (3)$$

У разі існування класів споживачів відстані $d_{(s)}$ між однорідними парами споживачів ПЕР будуть концентруватися в лівій частині варіаційного ряду (3), а відстані між неоднорідними споживачами ПЕР – в правій. Для дослідження варіаційного ряду споживачів ПЕР побудуємо допоміжну числову послідовність наступного вигляду:

$$r_1, r_2, \dots, r_{s-1}, \quad s = \frac{n(n-1)}{2}, \quad (4)$$

де

$$r_i = \frac{r_{(i+1)}}{r_{(i)}}, \quad i = 1, 2, \dots, (s-1). \quad (5)$$

Для подальшого з'ясування структури споживачів ПЕР будемо досліджувати поведінку двох допоміжних варіаційних рядів, що одержують шляхом просіювання елементів допоміжної числової послідовності.

Алгоритм формування допоміжних варіаційних рядів має наступний вигляд.

1. Знайдемо евклідові відстані від першого споживача ПЕР x_{11} до решти усіх.
2. В числовій послідовності $d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}$ знаходимо мінімальні та максимальні елементи - d_{min} та d_{max} .
3. Повторюємо цю операцію для кожного споживача ПЕР x_i і з отриманих результатів формуємо дві множини відстаней $\tilde{D}_{min} = \{d_{min}^1, d_{min}^2, \dots, d_{min}^n\}$, та $\tilde{D}_{max} = \{d_{max}^1, d_{max}^2, \dots, d_{max}^n\}$.

Більшість елементів множини $\tilde{D}_{min}$ відповідають однорідним парам споживачів ПЕР, за наявності у часі елементів множини $\tilde{D}_{max}$ можуть відповідати як однорідним так і неоднорідним парам споживачів ПЕР.

Отримані множини $\tilde{D}_{min}$ та $\tilde{D}_{max}$ містять хоча б три рівних відстані, що відповідають одній й тій же парі споживачів ПЕР x_i, x_j та x_j, x_i . Виключивши по одній з таких відстаней з множин $\tilde{D}_{min}$ та $\tilde{D}_{max}$ та розташувавши ті, що залишилися в порядку зростання, отримаємо нові множини - варіаційні ряди відстаней:

$$\tilde{D}_{min} = \{d_{min}^{(1)}, d_{min}^{(2)}, \dots, d_{min}^{(n)}\}; \quad (6)$$

$$\tilde{D}_{max} = \{d_{max}^{(1)}, d_{max}^{(2)}, \dots, d_{max}^{(n)}\}; \quad (7)$$

елементи яких відповідають різним парам споживачів ПЕР.

За поведінкою варіаційних рядів $\tilde{D}_{min}$ та $\tilde{D}_{max}$ можна визначити структуру груп споживачів ПЕР на підприємстві. Якщо варіаційний ряд $\tilde{D}_{min}$ не має стрибків, то споживачі ПЕР підприємства однорідні за обраним критерієм визначення глибини енергетичного аудиту або їх можна поділити на близько розташовані класи з постійною щільністю. Якщо цей ряд містить хоча б один локальний мінімум, то споживачів ПЕР підприємства можна поділити на класи з різною щільністю. Серед них можуть бути такі, які містять по одному елементу – окремі споживачі, що сильно відрізняються від інших за рівнем енергоємності, число яких можна визначити.

Якщо варіаційний ряд $\tilde{D}_{max}$ не має стрибків, то споживачі ПЕР підприємства однорідні за обраним критерієм або складаються з близько розташованих класів. Якщо ж цей ряд має хоча б один значний локальний мінімум, то споживачів ПЕР підприємства можна поділити на k класів, в яких максимальні відстані неоднорідних пар мають різний порядок.

Сформуємо нові множини елементів, які будуть використані під час проведення класифікації споживачів методом гіперсфер. Виключивши з множин $\tilde{D}_{min}$ всі елементи, для яких має місце співвідношення:

$$d_{min}^{(i)} = 0(d_{max}^{(1)}) \quad (8)$$

та доповнивши ними множину $\tilde{D}_{max}$, отримаємо нові множини - варіаційні ряди:

$$\tilde{D}_{min} = \{d_{min}^{(1)}, d_{min}^{(2)}, \dots, d_{min}^{(u)}\}, \quad u \leq n - 1 - k; \quad (9)$$

$$\tilde{D}_{max} = \{d_{max}^{(1)}, d_{max}^{(2)}, \dots, d_{max}^{(u)}\}, \quad 1 \leq n - 1 + k. \quad (10)$$

Тоді можна вважати, що майже всі елементи множини породжуються однорідними парами споживачів ПЕР.

Стан споживачів ПЕР з гіперпросторі задається точкою, місце якої визначається величиною показників або параметрів критеріїв, що визначають глибину проведення енергетичного аудиту.

Алгоритм методу гіперсфер. Спочатку знаходять точки ущільнення загальної групи споживачів ПЕР, що прийняті спочатку за центри класів, одночасно проводиться попередній поділ на класи. Точки ущільнення знаходяться методом гіперсфер, що рухаються по площині. Рух гіперсфер починається з різних, так званих, опорних точок, та закінчується у точках ущільнення. Споживачі ПЕР, що включаються під час руху однією гіперсферою, вважаємо споживачами одного класу. Якщо декілька гіперсфер зупиняються в одній точці, то всі споживачі ПЕР, що включаються ними під

час руху, об'єднуються в один клас. Таким чином, отримаємо стільки класів, скільки точок ущільнення виявлено гіперсферами. Отримана кількість класів залежить від величини радіусу гіперсфер. Визначення оптимального значення цього радіусу d_{opt} впливає з даних аналізу варіаційного ряду (4). Питання визначення d_{opt} розглянуто в роботах.

Для визначення d_{opt} спочатку знайдемо середнє значення $\bar{d}$ допоміжної числової послідовності (4):

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^s r(i)}{s}. \quad (11)$$

Тоді значення радіусу гіперсфери має вигляд:

$$d_{opt} = \max(\bar{d}, d_{min}^{(u)}) + d_{min}^{(1)}, \quad (12)$$

де $d_{min}^{(u)}$, $d_{min}^{(1)}$ останній та перший члени варіаційного ряду.

Потім проводиться уточнення попередньої класифікації з огляду можливості виникнення класів з не порожнім перетином.

Модельні розрахунки розподілу енергоспоживаючого обладнання на класи за встановленою потужністю. Розподіл енергоспоживаючого обладнання (повітряних компресорів) за критерієм – встановлена потужність постійно працюючих електричних двигунів методом гіперсфер показав, що метод працює. Так група споживачів ПЕР із встановленою потужністю (МВт):

$$X = \left\{ \begin{array}{l} 1, 6; 1, 6; 1, 6; 1, 6; 3, 15; 3, 15; 1, 75; 1, 75; 1, 75; 1, 75; 10; 10; \\ 1, 5; 1, 5; 1, 5; 1, 5; 3, 5; 1, 6; 10; 9; 10; 9; 10; 9; 10; 10; 10 \end{array} \right\}$$

була розділена на два наступні класи

$$\begin{aligned} M_{13}^{(0)} &= \{1, 6; 1, 6; 1, 6; 1, 6; 3, 15; 3, 15; 1, 75; 1, 75\}, \\ M_{20}^{(0)} &= \{1, 75; 1, 75; 1, 5; 1, 5; 1, 5; 1, 5; 3, 5; 1, 6\}, \\ M_{20}^{(0)} &= \{10; 10; 10; 9; 10; 9; 10; 10; 10\}. \end{aligned}$$

Таким чином, було отримано два класи електрообладнання - компресорів, один з яких характеризується більшою встановленою потужністю порівняно з іншим класом. Цей клас визначає межі обсягу робіт під час проведення енергетичного аудиту і включає в себе компресори К-1500-62-2 та К-1700-61-1 потужністю 9 та 10 МВт, які підлягають першочерговому обстеженню.

Висновки. В результаті проведення досліджень розроблено:

1. Алгоритм класифікації споживачів ПЕР за різними факторами, що базується на використанні методу гіперсфер і який дозволяє визначати межі обсягу робіт під час проведення енергетичного аудиту;

2. Методику визначення меж проведення енергетичного аудиту, що дозволяє сфокусуватися на певних споживачах, які мають найбільший потенціал енергозбереження, що дозволить зекономити час виконання робіт та підвищити рівень якості енергетичного аудиту.

УДК 620.9:656.2

ЗАСОБИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

К.т.н., доц. Нерубацький В.П., Фалєєв Ф.Р., Огурцов С.С.

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків

NVP9@i.ua; fedya.faleev2004@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доц. Нерубацький В.П.

Енергозбереження під час експлуатації високошвидкісного залізничного транспорту є одним із пріоритетних завдань в умовах зростання цін на енергоресурси та необхідності зниження впливу на навколишнє середовище. Високошвидкісні залізничні системи потребують значних обсягів електроенергії, особливо під час руху на швидкостях, що перевищують 200–250 км/год, тому впровадження ефективних засобів енергозбереження є невід’ємною частиною сталого розвитку цього виду транспорту.

Одним із ключових напрямів енергозбереження є вдосконалення рухомого складу. Сучасні високошвидкісні поїзди проєктуються з урахуванням аеродинамічних характеристик, що дає змогу знижувати опір повітря і, як наслідок, споживання енергії [1]. Використання легких і міцних матеріалів, таких як алюмінієві сплави і композити, дає можливість зменшити масу поїзда, знижуючи енергоємність руху. Також велика увага приділяється системам рекуперації енергії гальмування – енергії, що виділяється під час гальмування, яка може повертатися в контактну мережу або використовуватися для живлення власних потреб поїзда.

Значну роль у підвищенні енергоефективності відіграє автоматизація керування рухом поїздів [2]. Системи автоматичного ведення дають змогу обирати оптимальний режим руху та стану контактної мережі. Це дає можливість уникати різких розгонів і гальмувань, забезпечуючи більш плавний і економічний рух. Крім того, важливим аспектом є використання сучасних тягових приводів з підвищеним ККД, зокрема асинхронних і синхронних двигунів з постійними магнітами.

Інфраструктурні заходи також сприяють зниженню енергоспоживання. До них належать модернізація контактної мережі, зниження втрат у системах електропостачання, а також регулярне технічне обслуговування колії та рухомого складу з метою зниження механічних втрат. На станціях і в депо використовуються інтелектуальні системи клімат-контролю.

Особлива увага приділяється екологічним та економічним аспектам, пов’язаним з використанням поновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітроустановки для живлення окремих елементів інфраструктури [3, 4]. Застосування таких рішень сприяє зниженню залежності від традиційних джерел енергії та підвищує стійкість залізничного транспорту.

У Європі високошвидкісний залізничний транспорт давно став полем для впровадження інноваційних засобів енергозбереження, спрямованих на

підвищення ефективності та зниження впливу на навколишнє середовище. Одним із ключових напрямків стало впровадження систем рекуперації енергії гальмування, що дають змогу повертати значну частину витраченої електроенергії назад у мережу. Поряд з цим активно розвиваються інтелектуальні системи керування рухом поїздів, які автоматично підбирають оптимальні режими прискорення і гальмування, мінімізуючи втрати енергії під час експлуатації [5]. У поїздах застосовуються тягові приводи нового покоління з високим коефіцієнтом корисної дії, легкі кузови з алюмінієвих сплавів і композитів, що знижують масу і споживання енергії. Залізнична інфраструктура модернізується з урахуванням сучасних вимог до енергетичної ефективності – використовуються трансформатори з низькими втратами, інтелектуальні підстанції та автоматизовані системи моніторингу енергоспоживання.

У Німеччині на високошвидкісних поїздах ICE впроваджено системи рекуперації енергії, а також автоматичні системи керування тягою, що дають змогу адаптувати рух до профілю маршруту та зменшувати пікове споживання. Додатково Deutsche Bahn активно розвиває енергетичну інфраструктуру з інтеграцією відновлюваних джерел енергії та розумних мереж. У Франції компанія SNCF модернізувала рухомий склад TGV, впровадивши легкі матеріали та ефективні аеродинамічні форми, а також просуває програму Eco-Train, в рамках якої оптимізуються графіки руху і мінімізується споживання за рахунок точного планування. В Іспанії на лінії AVE використовуються поїзди з інтелектуальними системами енергоменеджменту, а інфраструктуру обслуговують із застосуванням сонячних панелей і енергоефективного освітлення на станціях. У Нідерландах весь пасажирський залізничний транспорт вже з 2017 року повністю перейшов на електроенергію, одержану з вітрових електростанцій, що робить країну лідером за частиною «чистої» тяги. В Італії поїзди Frecciarossa 1000 поєднують у собі легкі кузови, системи рекуперації та тягове обладнання останнього покоління з високими ККД, а також обладнані цифровими платформами для моніторингу енергетичної ефективності в реальному часі. Впроваджуються технології маховикових накопичувачів енергії [6, 7], наприклад, на станціях у Швейцарії, які акумулюють надлишкову енергію від гальмування поїздів і повторно подають її в мережу, знижуючи навантаження на електропостачання. Зазначені приклади показують, що європейські країни не тільки інвестують в енергоефективність, а й демонструють практичне впровадження інновацій у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, засоби енергозбереження на високошвидкісному залізничному транспорті охоплюють широкий спектр технічних і організаційних рішень, спрямованих на раціональне використання ресурсів, зниження експлуатаційних витрат і мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Їх впровадження дає змогу не тільки підвищити економічну ефективність перевезень, а й сприяє сталому розвитку транспортної галузі в умовах викликів.

Список літератури:

1. Weidner D. Aerodynamics of high-speed trains with respect to ground simulation / D. Weidner, D. Stoll, T. Kuthada, A. Wagner // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7, Iss. 7. – 228.
2. Wei G. Energy-efficient automatic train operation for high-speed railways: Considering discrete notches and neutral sections / G. Wei, S. Zhu, Y. Wang, W. Chen, S. Lu, S. Sha, L. Li // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. – 2022. – Vol. 145. – 103884.
3. Нерубацький В.П. Топологія системи збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій за рахунок двоступеневого диференціального перетворювача потужності / В.П. Нерубацький, О.А. Плахтій, Д.А. Гордієнко // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. – 2024. – Вип. 207. – С. 107–118.
4. Плахтій О.А. Динаміка, концепції та перспективи розвитку вітрової енергетики / О.А. Плахтій, В.П. Нерубацький, Д.А. Гордієнко, Д.А. Шелест, А.В. Синявський // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2022. – Том 27, № 4. – С. 3–14.
5. Su S. A stabilized virtual coupling scheme for a train set with heterogeneous braking dynamics capability / S. Su, J. She, D. Wang, S. Gong, Y. Zhou // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2023. – Vol. 146. – 103947.
6. Amiryar M.E. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications / M.E. Amiryar, K.R. Pullen // *Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 7, Iss. 3. – 286.
7. Olabi A.G. Critical review of flywheel energy storage system / A.G. Olabi, T. Wilberforce, M.A. Abdelkareem, M. Ramadan // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, Iss. 8. – 2159.

УДК 656.6

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗА РАХУНОК ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ

Коренкова М.О., Коренков О.О., Телегін О.В.

*Херсонський навчально-науковий інститут національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*
vsevoloddsamohvalov@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., доцент Самохвалов В.С.

Дотримання енергозберігаючої політики завжди має позитивний вплив на оточуюче середовище, а також сприяє заощадженню експлуатаційних витрат на пальне та подовжує ресурс енергетичного обладнання. Таким чином, енергозбереження за рахунок організаційних заходів – актуальне питання сьогодення.

До організаційних заходів, які пов'язані з економією пального відносять: очищення корпусу судна від обростання, вибір найвигіднішого оптимального шляху судна та оптимальної швидкості судна, а також оптимізація експлуатаційних ремонтних циклів від початку експлуатації до списання судна.

Енергозбереження повинно закладатися при проектуванні, забезпечуватися в процесі суднобудування та реалізовуватися в процесі експлуатації судна [1].

В [1] розглядалися питання енергозбереження на судах в основному виходячи з можливостей удосконалення елементів суднової енергетичної установки (СЕУ) як за рахунок використання теплоти відхідних газів і охолоджувальних рідин двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) так і за рахунок очищення поверхонь нагріву, а також розглядалися питання енергозбереження в судових електричних станціях та енергозберігаючі технології на основі термогазодинамічного ефекту. В останній главі [1] автори проаналізували енергозберігаючі технології за рахунок використання інноваційних видів рушіїв. Розвиваючи цей напрям, доцільно розглянути питання як впливає обростання корпусу судна на його економічні показники.

З самого початку судноплавства утворення водних організмів на підводній частині кораблів розглядалося як серйозна проблема, що гальмує розвиток суднобудування. Ранні середземноморські культури, середньовічні вікінги, трансокеанські європейські імперії, починаючи з періоду нової історії, а також сучасні торгові та військові кораблі стикаються з цією проблемою, і ніхто не може знайти її задовільного рішення. Спостереження та контроль за обростанням підводних частин корабля існують протягом усієї історії судноплавства.

Під обростанням розуміють небажану акумуляцію мікроорганізмів, водоростей та тваринних організмів на конструкціях, занурених у морську воду. Біовідкладення поділяють на мікровідкладення або мікрозабруднення (бактеріальні біоплівки та шари діатомових або кремнієвих водоростей) та макровідкладення (наприклад, макроводорості та тваринні організми — морські качки, жолуді, гуси, мідії, трубчасті черв'яки, мшанки, асцидії), які існують

разом, утворюючи загальне забруднення. Будь-яка поверхня, занурена в морську воду, покривається шаром адсорбованих органічних сполук: полісахаридів, ліпідів та протеїнів. Менш ніж за добу після утворення такого шару починається процес обростання. Початковий шар складається в основному з бактерій та кремнієвих (діатомових) водоростей, які вбудовуються всередину біоплівкових структур.

Вторинна колонізація – осідання макроводоростей, грибів та найпростіших одноклітинних організмів, які, згідно з літературними даними, потрапляють на поверхню приблизно протягом тижня після занурення, якщо цьому сприяють умови довкілля. Осідання безхребетних личинок часто розглядають як останню стадію процесу утворення морських біовідкладень: їхня поява на поверхні відбувається через два-три тижні після занурення.

«Кожух» з мікро- і макроводоростей, що утворився в процесі обростання на корпусі судна, гальмує його рух, при цьому швидкість може падати на 40% і більше. Найбільше на гальмування судна впливають макроводорості, поверхня корпусу при їх наростанні стає дуже шорсткою та горбистою. Для отримання ефективних антиобрастаючих покриттів необхідно ретельно вивчити основні властивості численних біоорганізмів, що утворюють відкладення, та її адгезію.

При розробці організаційних заходів по очищенню корпусу судна від обростання необхідно враховувати час перебування судна в солоній і прісній воді, а також температуру забортної води. Інтенсивність обростання в тропічних водах значно вища ніж в полярних.

Врахування впливу метеорологічних факторів на роботу суднової енергетичної установки розглянуто в [2]. Оптимальна швидкість судна вибирається з урахуванням вимог запобігання зіткненню, гідрометеорологічних факторів, економічних міркувань.

З економічних міркувань судну може бути задана економічна швидкість, за якої витрата палива на пройдену милю буде найменшою. З точки зору гідродинаміки, судноводій, обравши безпечну швидкість, яка забезпечує відсутність штормових пошкоджень від днищового та бортового слемінгу, гідродинамічних ударів хвиль по палубному вантажу та палубним конструкціям; виключає або зводить до мінімуму заливання головної палуби; уникає попадання судна в зону резонансної бортової хитавиці, зниження стійкості та втрати керованості на попутній хвилі та ін. Вибір безпечного поєднання курсу та швидкості судна рекомендується проводити з використанням універсальної діаграми хитавиці Ю.В. Ремеза.

З точки зору попередження зіткнень з суднами, плаваючими предметами, іншими об'єктами, що знаходяться в морі, вибір безпечної швидкості регламентують Правила запобігання зіткненню суден у морі «МПЗЗС-72».

При хорошій видимості та відсутності поблизу інших суден зазвичай вибирають режим повного ходу. При обмеженій видимості (< 5 миль) основою вибору безпечної швидкості є припущення про надійної дальності виявлення ехо-сигналів найменших за розміром суден, із якими можлива зустріч у цьому районі.

Безпечна швидкість має бути такою, щоб при раптовому виявленні інших суден або об'єктів на близьких дистанціях (коли немає часу для визначення її елементів руху та повної оцінки ситуації) мати можливість зупинити судно в межах половини дальності впевненого виявлення.

Вибраний найвигідніший (оптимальний) шлях судна наноситься на маршрутні морські навігаційні карти, координати маршрутних точок вводяться в автоматичні приймачі-індикатори. Таким чином, здійснюється розрахунок курсів для стернового з урахуванням очікуваних параметрів вітру, течії та очікуваного часу переходу. Розрахунок очікуваного часу прибуття здійснюється за допомогою ЕТА (Estimated Time of Arrival).

Дотримання експлуатаційно ремонтних циклів та термінів їх виконання і обсягів з метою підвищення надійності СЕУ регламентовані вимогами класифікаційних товариств (Регістра) до безпеки мореплавання, а покращення енергозберігаючих показників – попутний ефект.

Таким чином, для зменшення втрат пального та скорочення часу виконання рейсового завдання необхідні такі організаційні заходи, які враховують динаміку обростання корпусу судна, вибір сучасного захисного покриття корпусу судна та застосування передових методів очищення корпусу від обростання. При виборі курсу судна та його швидкості з економічних міркувань доцільно враховувати метеорологічні фактори (стан моря, напрямок і силу вітра) курс судна та ін. А так як параметри цих величин неперервно змінюються, доцільно мати таке програмне забезпечення, яке враховує динаміку цих величин.

Список літератури:

1. Вторинні енергетичні ресурси та енергозбереження на судах: навчальний посібник / В.С. Самохвалов, Д.В. Коновалов, М.Ю. Багненко та ін. / за заг. ред. В. С. Самохвалова. – Миколаїв: Іліон, 2016. – 430 с.
2. Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт: навч. посіб. / В.П. Шостак, В.І. Гершанік, В.П. Кот та ін. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 500 с.

УДК 728.1

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМ ПІДЛОГОВОГО ОПАЛЕННЯ

Філічкін Д.К., 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.

Переривчасте опалення широко використовується для економії енергії та зниження експлуатаційних витрат, особливо у будівлях, які не використовуються цілодобово [1, 2]. Підлогове (особливо водяне) опалення має високу теплову інерцію: повільно остигає, зберігає тепло навіть при відключенні, а також дозволяє використовувати перерви без значного зниження температури. Але також має й недоліки: довго нагрівається після включення, не підходить для приміщень, де потрібна швидка зміна температури.

При проектуванні потрібно враховувати теплову інерцію підлоги (масивні стяжки довго нагріваються/охолоджуються). Дослідження показують, що переривчасте опалення може зменшити енерговитрати на 10–30 % [2]. Так само як і зниження температури на $3\div 4^{\circ}\text{C}$ вночі або без людей, а також оптимальний час включення до приходу людей.

Рівномірність нагрівання теплої підлоги – один із ключових показників комфорту та ефективності системи. Вона означає, наскільки однакова температура поверхні підлоги на всій площі. Ідеальна система має забезпечувати плавний та рівномірний розподіл тепла – без «гарячих» чи «холодних» зон. На рівномірність нагрівання впливає крок укладання труб або кабелю, матеріали стяжки та покриття підлоги, температура теплоносія або нагрівального елемента, схема укладання та теплоізоляція. Різниця температур в $1\div 2^{\circ}\text{C}$ майже непомітна, а великі значення викликають дискомфорт перебування людей.

Розроблена математична модель нестационарної теплопередачі при роботі систем підлогового опалення. В дослідженні прийнята водяна система підлогового опалення та електрична стрижнева. Як показали розрахунки температура поверхні підлоги впродовж деякого часу продовжує збільшуватися при відключенні подачі теплоти, на що впливає нерівномірний нагрів перетину стяжки. Розроблена математична модель дозволяє дослідити нестационарні процеси теплопередачі в підлогових системах опалення та в подальшому оптимізувати їх роботу.

Список літератури:

1. Глушко Ю.Ю. Опалення. Навчальний посібник / Ю.Ю. Глушко, В.М. Кузніченко, М.В. Пеховка – К.: ТОВ «Компанія МТП», 2016. – 115с.
2. Ратушняк Г.С., Попова Г.С. Енергозбереження та експлуатація систем теплопостачання / Г.С. Ратушняк, Г.С. Попова. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 120с.

УДК 629.5.03

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ СУДНОВИХ РУШІЙ

Шевченко Г.О., Самохвалова А.О., Халдобін П.В.

*Херсонський навчально-науковий інститут національного університету
кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Херсон
sevcenkogosa8@gmail.com*

Науковий керівник: к.т.н., доц. Самохвалов В.С.

Плавучі засоби здійснюють прямолінійні рухи, а рушій (гвинти, колеса) – обертові. На нашу думку, така трансформація механічної енергії призводить до її втрат. До того ж, в живій природі, яка мільйони років пристосувалася до оточуючого середовища, переміщення у воді відбувається без здійснення обертових рухів рушійми [1]. Дотримання енергозберігаючої політики завжди має позитивний вплив на оточуюче середовище, а також сприяє заощадженню експлуатаційних витрат на паливе та подовжує ресурс енергетичного обладнання.

Мета дослідження – визначення зв'язку між формою, розмірами та пружністю пластинчатого рушія з еластомірного матеріалу та розміром тяги, яку він створює.

Під час руху судна відбувається неперервна трансформація енергетичних потоків. В тепловому двигуні хімічна енергія палива при його спалюванні спочатку перетворюється в теплову енергію, а потім теплова енергія перетворюється в механічну енергію, яка і надходить до рушія. Завдяки рушію підведена до нього механічна енергія забезпечує переміщення судна. Але не вся механічна енергія витрачається на переміщення судна, або, як кажуть, забезпечує тягу судну. Деяка її частина витрачається на перебовтування води, створюючи так званий кильватерний слід. І чим цей слід виразніший, тим більша частина енергії витрачається даремно. Як відомо, безслідно енергія не зникає. В даному випадку механічна енергія, яка не використалась для забезпечення руху судна, буде використана на нагрівання води.

Таким чином, кильватерний слід як лакмусовий папірець дозволяє оцінювати ступінь досконалості рушія. І якщо спостерігати за рухом риб, то можна помітити, що у них кильватерний слід майже відсутній. Це і привернуло увагу професора Сліжевського Н.Б. із Національного університету кораблебудування до вивчення способів плавання гідробіонтів. Але ані математичних моделей, які б описували рух гідробіонтів, ані експериментальних досліджень не було зроблено.

Значний внесок у розробку теорії руху риб було зроблено українським кораблебудівельним інженером Костенко В.П.(1881- 1956).

В дослідженнях розглядають вигин хвоста риби, як вібруючу пластину, особливість якої полягає в тому, що риба «за бажанням може змінювати ступінь пружності свого механізму». Йому вдалось виявити загальні закономірності в

кінематиці плавання риб і роботи лопаті гребного гвинта, що надає можливість перейти до розрахунку «риб'ячого хвоста», використовуючи звичні для суднобудівників терміни і формули.

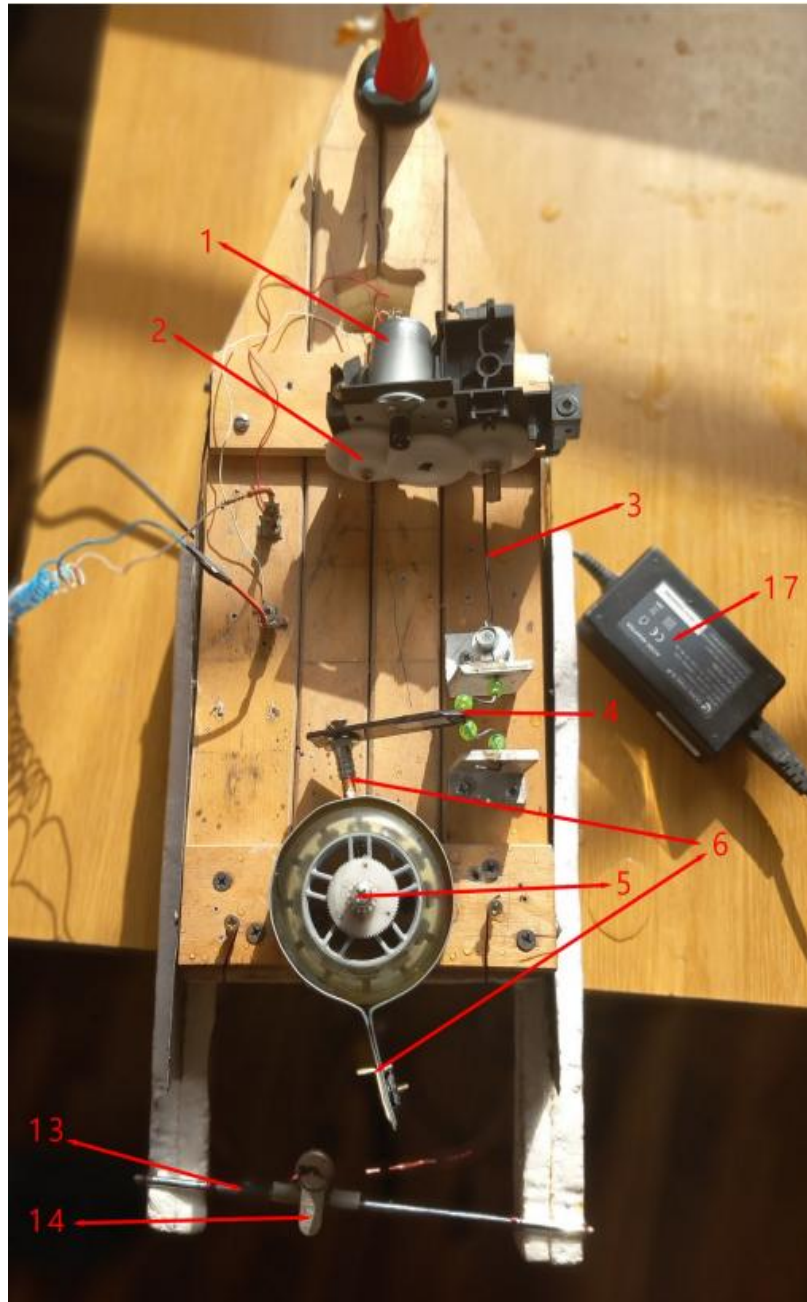


Рисунок 1 – Розташування елементів пропульсивної установки (платформа пропульсивного комплексу)

Перший дослідний зразок рушія запропонованого типу виготовили і підготували до установки на 12-метровий катер «Дельфін» (з потужністю двигуна 25 к.с.). Відомо, що відхилення пластини змінної жорсткості повинні були складати 15° . Але випробувати «Дельфін» з «риб'ячим хвостом» так і не довелося. Якраз в ці дні розпочалася світова війна. Катер реквізували для потреб Чорноморського флоту, а те, що із конструкцій нового рушія вже встигли змонтувати, безжалісно зрізали, а самі винахідники зайнялись виконанням військових замовлень.

Важче вибрати матеріал з необхідними механічними властивостями. В.П. Костенко писав: «Необхідно мати абсолютно гнучкий матеріал, не схильний до явищ втоми, і який має максимальну пружність».

З того часу пройшло майже сто років і, на нашу думку, сьогодні таким вимогам в повній мірі відповідають еластоміри. За цей час еластоміри успішно використовуються в якості рушіїв на автомобільному транспорті.

Технічні рішення [2,3] реалізовані при розробці, виготовленні та випробуванні діючого макету суднової пропульсивної установки.

Розташування елементів цієї установки зображено на рис. 1, а швартові та ходові випробування проілюстровані в [4].

Живлення діючого макета здійснюється блоком живлення – 17 потужністю 40 Вт, напруга 12 V постійного струму силою 3.33 А. До складу пропульсивної установки входять електродвигун – 1; двоступеневий зубчастий редуктор – 2; гнучка муфта – 3; шатуннокривошипний механізм (кривошип – 2 см, шатун – 6 см) – 4; вертикальна вісь повороту – 5; румпельні важелі (по 65 см кожний) – 6.

Висновок: Заміну і ремонт пластинчатих рушіїв можна виконувати без докування судна. Вартість пластинчатого рушія значно нижча ніж гвинта. Технологія виготовлення пластинчатих рушіїв значно простіша ніж гвинтів. Мілководдя та засмічені водоймища не чинять перешкод для судна оснащених пластинчатими рушіями. Для суден з пластинчатими рушіями притаманна акустична мімікрія. Відео-матеріал по швартовим та ходовим випробуванням макету пропульсивного комплексу з еластомірними рушіями представлено в [4].

Список літератури:

1. Самохвалов В.С. Шляхи вдосконалення пропульсивних комплексів морських бойових дронів / В.С. Самохвалов, О.П. Воїнов, Г.О. Кобалава, С.О. Воїнова // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT - 2023), Херсон, 24-25 травня 2023 р. – С. 131-132.

2. Патент України №18438 У. Гідрореактивний судовий двигун / Самохвалов В.С., Ткаченко С.Г., Цвікліс В.С., Багненко М.Ю., Махонко О.В. МПК В63Н 11/02. Заявл. 18.04.2006 №4200604326. Опубл. 15.11.2006. Бюл. №114.

3. Патент України №157595 У. Суднова рухова гідроактивна установка / Воїнов О.П., Воїнова С.О., Самохвалов І.Є., Самохвалов В.С., Шостак В.П. МПК В63Н 11/00. Заявл. 07.11.2023 №202305282. Опубл. 06.11.2024. Бюл. №45.

4. Youtube [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://youtube.com/shorts/sgaq9Mp-o0o?si=rPg4iimT_iPSnTLU. – Назва з екрану.

Секція 5

Економічні та екологічні аспекти енергозбереження

УДК 66.094.8:661.5

ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ВІД ОКСИДІВ АЗОТУ

К.т.н., доц. Кузнецов С.І., к.т.н., доц. Венгер О.О.,
Івкіна Е.С.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
ksieko1@gmail.com

науковий керівник: к.т.н., доц. Кузнецов С.І.

Сьогодні в світі більш ніж 60% електроенергії виробляється на теплоелектростанціях. При спалюванні газоподібного, рідкого або твердого палива вони викидають у навколишнє середовище багато небезпечних речовин. Серед них великий відсоток займає оксид азоту.

Забруднення повітря навіть у малих дозах може завдати серйозної шкоди здоров'ю людей [1]. Від забруднення атмосферного повітря, насамперед, страждають органи дихання людини. Крім того, оксиди азоту, з'єднуючись в атмосфері з парами води, утворюють кислоти, які у вигляді кислотних дощів потрапляють у ґрунт та закислюють його. Відновлення родючості закислених ґрунтів потребує великих матеріальних витрат.

Метою проведених досліджень була розробка методу термічного розкладання оксидів азоту [2-4], що забезпечує очищення газів до гранично допустимих концентрацій.

Суть розробленого методу полягає у наступному: у реакторі спалюється природний газ. У якості окислювача для спалювання природного газу служить суміш нітрозного газу з киснем або повітря [5]. Кількість газу, що подається на спалювання, повинна бути розрахована таким чином, щоб температура газової суміші досягала 1100-1200°C, і в газі залишалася мінімальна кількість кисню. За цієї температури відбувається розкладання значної частини оксидів азоту.

Реактор термічного розкладання оксидів азоту 7 виконаний із кварцового скла (рис. 1) [6]. Він складається з двох зон: у першій зоні відбувається нагрівання газової суміші та відновлення оксидів азоту у присутності газоподібного відновника 13, у другій зоні відновлення оксидів азоту протікає в присутності твердого відновника коксу 8. Реактор має форсунку 14 для спалювання природного і нітрозного газу. Установка обладнана ротаметрами 1-5 для вимірювання витрат окремих компонентів газової суміші термopарами 6 з приладами 11,12 для вимірювання температури в різних точках реактора. Крім того, у схемі встановлений змішувач 15 газів, теплообмінник 9 і точка відбору проб на газовий аналіз 10.

Повітря, азот і нітрозний газ змішується певної пропорції в змішувачі 15 і подається в реактор. Сюди через форсунку 14 надходить природний газ. В результаті горіння газу температура в першій зоні зростає до 1100-1200°C. Концентрацію оксидів азоту на вході визначали розрахунковим шляхом за кількістю компонентів, що дозуються. У другу зону реактора 8 завантажено

кокс. Розжарені гази, проходячи через другу зону, взаємодіють з коксом, у результаті відбувається розкладання залишків оксидів азоту [7]. Концентрацію оксидів азоту на виході визначали методом евакуйованих колб. За вмістом оксидів азоту на вході та виході визначалася ступінь розкладання оксидів азоту.

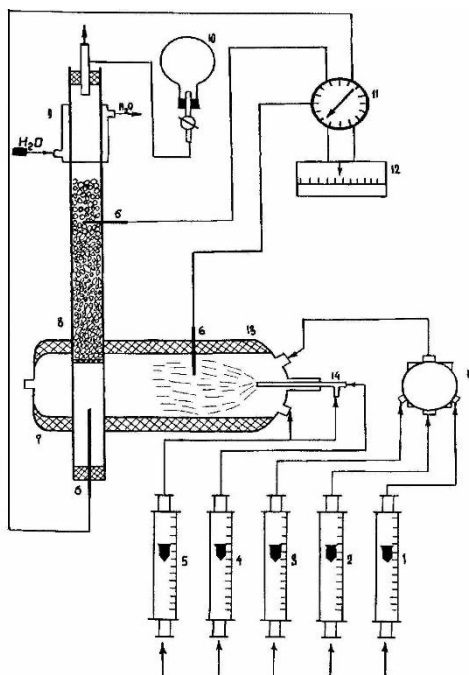


Рисунок 1 – Лабораторна установка термічного розкладання оксидів азоту: 1, 3-ротаметри (для повітря), 2-ротаметр (для CH_4), 4-ротаметр (для N_2), 5-ротаметр (для NO), 6-термопара, 7-реактор, 8-шар коксу, 9-теплообмінник, 10-колба, 11,12-термометри, 13-первинна зона реакції, 14-форсунка, 15-змішувач

Експериментально встановлений оптимальний технологічний режим процесу термічного розкладання оксидів азоту [8], а саме витрати пального газу, температура, кількість твердого відновника, об'ємна швидкість газів. У реактор для досягнення температури 1100°C подавалася суміш наступного складу: повітря – $2,22 \text{ м}^3/\text{год}$ (94%), пропан – $0,082 \text{ м}^3/\text{год}$ (3,61%), оксиди азоту – $0,04 \text{ м}^3/\text{год}$ (1,99 %). Усього – $2,351 \text{ м}^3/\text{год}$ (100%).

Після досягнення стійкої роботи реактора визначали концентрацію оксидів азоту на виході. Оскільки дослідження велися стосовно газів виробництва щавлевої кислоти, вміст оксидів у яких підтримувався на рівні 2,0-2,5%. Для досягнення такого відсоткового вмісту оксидів азоту в газовій суміші на установку подавалося $46 \text{ дм}^3/\text{год}$ NO . Витрата інших компонентів регулювалася з таким розрахунком, щоб температура в реакторі не знижувалася нижче $1000\text{-}1100^\circ\text{C}$. При цьому в реактор подавалася мінімальна кількість кисню, оскільки його наявність у газі пов'язана з перебігом побічної реакції: $\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + Q$ і додатково витрати коксу.

Після реактора у присутності твердого відновника (коксу) відбувається остаточне розкладання залишків оксидів азоту. Ступінь розкладання оксидів азоту у першій зоні реактора у присутності газу-відновника пропану становить 85,0-88,7%, а у другій зоні у присутності коксу – 97,4-99,5%. Концентрація

оксидів азоту на виході з лабораторної установки знаходилася у межах 0,02-0,05%. Для досягнення наведених показників необхідно дотримуватися наступного технологічного режиму: температура в I та II зоні – 1000°C, витрата пального газу – 3-4% від повного об'єму газу та повітря, що подається на згоряння, витрата коксу 0,25 кг на 1 кг оксидів азоту, що надходять до другої зони реактора.

Висновки. Досліджено процес термічного розкладання оксидів азоту на лабораторній установці у присутності газоподібних та твердих відновників. Показано можливість санітарного знешкодження оксидів азоту шляхом їх термічного розкладання без застосування дорогих каталізаторів.

Список літератури:

1. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 [Електронний ресурс] // № 1264-XII. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/conv/page> (дата звернення 05.10.2024). – Назва з екрану.
2. Мищенко А.В. Термический метод нейтрализации оксидов азота / А.В. Мищенко, С.И. Кузнецов // Вісник ХНТУ. – 2018. – №2(65). – С. 35-40.
3. Kuznyetsov S.I. Thermal conversion of nitrogen oxides in a flow reducing gas / S.I. Kuznyetsov, V.O. Maljejev, O.O. Sevenchenko, V.M. Bezpachenko // Екологічні науки: науково-практичний журнал. – 2021. – № 6(39). – С. 77-81.
4. Kuznyetsov S. I. Multi-tier absorber for cleaning of exhaust gases of kilns / S.I. Kuznyetsov, B.P. Sakovych // Екологічні науки. – 2019. – №24. – С. 8-11.
5. Кузнецов И.Е. Нові методи очищення газів від оксидів азоту / И.Е. Кузнецов. – Київ: Укр. НИИТИ, 1971. – 42 с.
6. Кузнецов С.И. Нейтрализация оксидов азота / С.И. Кузнецов, К.Н. Злотникова // Proceedings of the Conference: The development of technical sciences: problems and solutions. Brno, 2018. – С. 117–121.
7. Kuznietsov S.I. Oxidation of nitrogen oxides by oxygen in the liquid phase / S.I. Kuznietsov, O.A. Venher, V.M. Bezpachenko, O.O. Semchenko, Y.S. Ivkina // Вісник ХНТУ. – 2023. – № (3)86. – С. 27-33.
8. Kuznietsov S.I. Efficiency of liquid oxidizers for purification of industrial waste gases from nitrogen oxides / S.I. Kuznietsov, O.A. Venher, V.M. Bezpachenko, O.O. Semchenko, Y.S. Ivkina // Вісник ХНТУ. – 2023. – № (4)87. – С. 70-77.

УДК 502.3:662.613.5

ВИКИДИ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ВІД ГАЗОТУРБІННИХ ТА ГАЗОПОРШНЕВИХ УСТАНОВОК ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Тесленко М.О., Островський А.В., ас. Беднарська І.С.

Національний технічний університет України

«КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ

m.teslenko006@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Електрогенеруючі установки, які використовують сучасні газотурбінні та газопоршневі технології, найближчим часом стануть основою розподіленої енергетики України, що підвищить її стійкість, надійність та ефективність в умовах воєнного та післявоєнного часу [1,2].

Газотурбінні та газопоршневі енергетичні установки характеризуються низкою позитивних властивостей: високий електричний коефіцієнт корисної дії, відносно низькі шум і вібрації при роботі, широкий діапазон потужності, низькі витрати електроенергії на власні потреби, економічна робота на часткових режимах, серійне виробництво та розвинене сервісне обслуговування, можливість використання різних видів палива (біогаз, синтез - гази, водень) [3,4].

В Європейському Союзі (ЄС) висуваються жорсткі вимоги до екологічної безпеки промислових установок. Зокрема Директива (ЄС) 2010/75/EU [5] та Директива (ЄС) 2015/2193 [6], які мають обов'язковий характер щодо їх виконання країнами – членами ЄС, визначають граничні значення викидів забруднюючих речовин від спалювальних установок середньої (від 1 МВт_т до 50 МВт_т) та великої теплової потужності (від 50 МВт_т і більше). При цьому враховується сумарна теплова потужність використаного палива від однієї чи більше спалювальних установок, під'єднаних до одного димаря (джерела викидів забруднюючих речовин).

Директива (ЄС) 2010/75/EU імплементована в законодавство України у вигляді нормативного документу «Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт» [7] та є обов'язковою для виконання в нашій країні. Директива (ЄС) 2015/2193 поки що для України має рекомендаційний статус, однак при вступі України до ЄС також стане обов'язковою для виконання. Ці обставини обумовлюють актуальність забезпечення відповідності існуючих та майбутніх газотурбінних та газопоршневих енергетичних установок в Україні цим екологічним вимогам.

Метою даного дослідження є проведення порівняльного аналізу гранично - допустимих викидів забруднюючих речовин від газотурбінних та газопоршневих енергетичних установок, що працюють на природному газі, з урахуванням категоризації за тепловою потужністю на один димар (менше 50

МВт_т та понад 50 МВт_т). Насамперед, оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO) - основних забруднюючих речовин, які утворюються при роботі цих енергетичних установок.

За результатами аналізу Директиви (ЄС) 2010/75/EU та Директиви (ЄС) 2015/2193 в табл. 1 та на рис.1 та рис. 2 систематизовано наведені граничні значення викидів NO_x та CO для газотурбінних (ГТУ) та газопоршневих (ГПУ) установок для двох категорій за різною сумарною тепловою потужністю на один димар: менше 50 МВт_т та понад 50 МВт_т.

Таблиця 1

Граничні значення викидів для ГТУ та ГПУ

Категорія потужності (МВт)	Газотурбінні установки				Газопоршневі установки			
	Забруднююча речовина/концентрація				Забруднююча речовина/концентрація			
	NO _x , мг/нм ³		CO, мг/нм ³		NO _x , мг/нм ³		CO, мг/нм ³	
Паливо	Прир. газ	Біогаз	Прир. газ	Біогаз	Прир. газ	Біогаз	Прир. газ	Біогаз
1–50 наявні	200	60	не нормується	не нормується	190	60	не нормується	не нормується
1–50 нові	75	15	не нормується	не нормується	95	15	не нормується	не нормується
> 50	50	-	100	-	50	-	100	-

Аналіз отриманих результатів показує, що для категорії потужності менше 50 МВт_т граничні значення викидів CO не регламентуються, що може впливати на вибір технології при проектуванні об'єктів. Для категорії понад 50 МВт_т встановлено суворіші вимоги до викидів NO_x та CO, що обумовлює застосування технологій запобігання утворенню NO_x або доочищення газоподібних продуктів спалювання природного газу від NO_x. Для ГТУ та ГПУ, що використовують як паливо біогаз, додатково регламентуються граничні значення граничних значень викидів двоокису сірки.

Для ГТУ потужністю понад 50 МВт фактичні середні викиди NO_x становлять 150 мг/м³ (за даними [8]), що на 30% вище порівняно з ГПУ. Цю обставину можна пояснити більш інтенсивнішим питомим тепловим навантаженням при згоранні палива. Наявність різних вимог щодо двох категорій за різною сумарною тепловою потужністю на один димар (менше 50 МВт_т та понад 50 МВт_т) дозволяє переводити ГТУ та ГПУ з однієї категорії (понад 50 МВт_т) з більш жорсткими вимогами до іншої (менше 50 МВт_т) шляхом відповідного групування кількості цих енергетичних установок до одного димаря.

Результати можуть бути використані при плануванні та модернізації енергетичних об'єктів України під час повоєнної відбудови енергетичного сектору країни з метою відповідності екологічним стандартам ЄС.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення впливу біогазу (біометану), водню та водневих паливних сумішей на викиди

забруднюючих речовин, а також на застосування технологій запобігання утворенню NO_x або доочищення газоподібних продуктів від NO_x при спалюванні природного газу на газотурбінних та газопоршневих енергетичних установках.

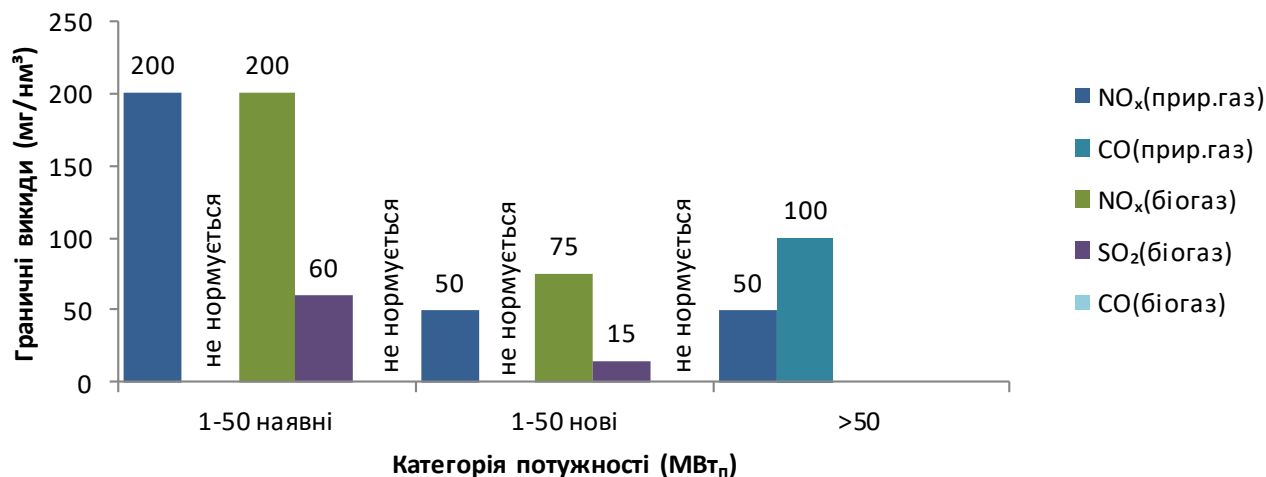


Рисунок 1 – Граничні значення викидів для газотурбінних установок

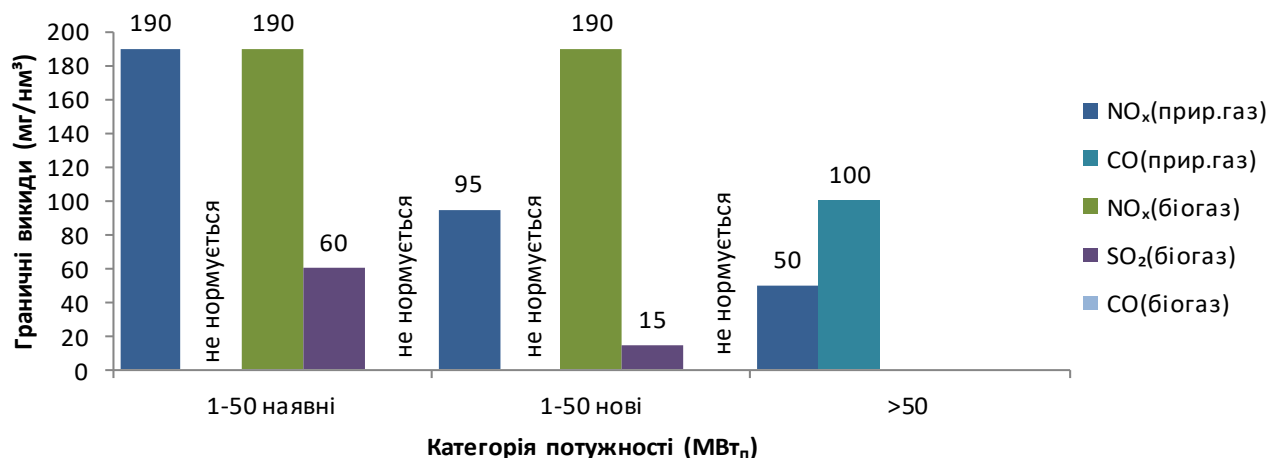


Рисунок 2 – Граничні значення викидів для газопоршневих установок

Висновки. Виконано порівняльний аналіз граничних викидів оксидів азоту та оксиду вуглецю для газотурбінних і газопоршневих енергетичних установок, які спалюють природний газ, у відповідності до вимог Директиви (ЄС) 2010/75/EU та Директиви (ЄС) 2015/2193. Особливу увагу було приділено категоризації установок за тепловою потужністю на один димар – менше та понад 50 МВт_т. З'ясовано, що для установок з потужністю менше 50 МВт_т норми викидів СО не є регламентованими, але для установок з більшою електричною потужністю (понад 50 МВт_т) нормативні вимоги характеризуються жорсткими граничними значеннями.

Список літератури:

1. Халатов А.А. Газотурбінні та газопоршнєві електростанції для децентралізованої енергетики України / А.А. Халатов, Н.М. Фіалко // Системні дослідження в енергетиці. – 2025. – 1(81). – С. 4-14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004>
2. Беднарська І.С. Технологічна модернізація енергетики України: виклики та можливості для сталого розвитку / І.С. Беднарська, Т.В. Шелешей, М.О. Тесленко, С.С. Яценко, А.В. Островський // Refrigeration Engineering and Technology. – 2024. – 60(4). – С. 297-308. <https://doi.org/10.15673/ret.v60i4.3076>
3. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants / Thierry Lecomte et al. – Publications Office of the European Union, 2017. – 986 p.
4. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. February 2009. (corrected version as of 09/2021) [Electronic resource]. – Access mode: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-09/ENE_Adopted_02-2009corrected20210914.pdf. – Title from the screen.
5. Directive 2010/75/EU on industrial emissions - power generation installations limits. International Energy Agency [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iea.org/reports/european-union-2020>. – Title from the screen.
6. Directive (EU) 2015/2193 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants [Electronic resource]. – Access mode: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>. – Title from the screen.
7. Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт [Електронний ресурс] / Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, затверджено наказом від 22.10.2008 р. №541. – (Нормативний документ Мінприроди України. Норматив). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08>. – Назва з екрану.
8. Gensets and the Medium Combustion Plant Directive [Electronic resource] / Modern Power Systems. – Access mode: <https://www.modernpowersystems.com/analysis/gensets-and-the-medium-combustion-plant-directive-5773387/>. – Title from the screen.

УДК 628.52: 504.06

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЗОТООЧИСНИХ УСТАНОВОК

Матусевич Х.Б., ас. Беднарська І.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

khrustynamatysevych@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Однією з найгостріших екологічних проблем сучасної теплоенергетики є викиди оксидів азоту (NO_x), що утворюються під час згоряння органічного палива, зокрема мазуту, природного газу та вугілля. Ці сполуки – насамперед оксид азоту (NO) та діоксид азоту (NO_2) – становлять серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людини. Оксиди азоту не лише є токсичними, але й активно беруть участь у вторинних хімічних реакціях у атмосфері, які мають масштабні екологічні наслідки.

Зокрема, NO_x спричиняють утворення фотохімічного смогу, що є особливо небезпечним у великих міських агломераціях. Цей смог виникає внаслідок реакцій оксидів азоту з леткими органічними сполуками за участю сонячного випромінювання. Такий смог знижує якість повітря, ускладнює дихання, викликає подразнення очей та негативно впливає на імунну систему людини.

Крім того, оксиди азоту – одна з основних причин кислотних дощів. Потрапляючи в атмосферу, вони реагують з водяною парою, утворюючи азотну кислоту. Випадаючи у вигляді дощу, ці сполуки знижують рН ґрунтів і водойм, що спричиняє деградацію екосистем, зниження врожайності сільськогосподарських культур, загибель риб і мікроорганізмів у водних об'єктах [1].

Окрім цього, викиди NO_x негативно впливають на рослинність та ґрунти, змінюючи хімічний склад і порушуючи баланс азотних сполук. Це може призвести до надмірного збагачення азотом (евтрофікації), зменшення біорізноманіття та пригнічення росту окремих видів рослин.

Не менш важливою є й токсична дія NO_x на людину. Тривале вдихання цих газів може викликати хронічні захворювання дихальної системи, зокрема астму, бронхіт, а також погіршення серцево-судинного здоров'я. Діти та літні люди є особливо вразливими до таких впливів [2].

Основними джерелами викидів NO_x у теплоенергетиці є енергоблоки ТЕС, котельні установки, газові турбіни та інше обладнання, що працює на викопному паливі. Особливо високі концентрації утворюються при спалюванні мазуту та вугілля за високих температур [3].

З урахуванням зобов'язань України перед Європейським енергетичним співтовариством щодо зменшення промислових викидів, досягнення екологічно прийняттого рівня емісії NO_x стає не лише питанням технічної модернізації, а й законодавчої необхідності [2]. Особливо актуальним є впровадження ефективних азотоочисних установок при спалюванні високосірчастого мазуту,

оскільки одночасний викид оксидів сірки та азоту створює подвійне екологічне навантаження [4].

У цьому дослідженні було здійснено розрахунок питомого показника емісії оксидів азоту (k_{NO_x}) з урахуванням ефективності різних технологій очистки димових газів. Як паливо розглядали високосірчастий мазут марки 100, що має високий потенціал утворення забруднюючих речовин у процесі згоряння. Емісійний показник було скориговано відповідно до формули (1), яка враховує ефективність як первинних (режимно-технологічних), так і вторинних (азотоочисних) заходів.

Показник емісії оксидів азоту k_{NO_x} , г/ГДж, з урахуванням заходів скорочення викиду розраховується [4]:

$$k_{\text{NO}_x} = (k_{\text{NO}_x})_0 f_n (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (1)$$

де $(k_{\text{NO}_x})_0$ – показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж; f_n – ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні; η_I – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду; η_{II} – ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки); β – коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

Для аналізу було використано чотири типи азотоочисних технологій:

- 1) Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ).
- 2) Селективне каталітичне відновлення (СКВ).
- 3) Активоване вугілля (АВ).
- 4) DESONOX – SNOX.

Технологія DESONOX і її різновид SNOX базуються на каталітичному очищенні димових газів одночасно від оксидів сірки та азоту.

Кожна з технологій характеризується своїм ступенем ефективності та коефіцієнтом роботи, що були взяті з табл. Д11, додатка джерела [5].

Результати розрахунку зведені в представлену діаграму на рис. 1.

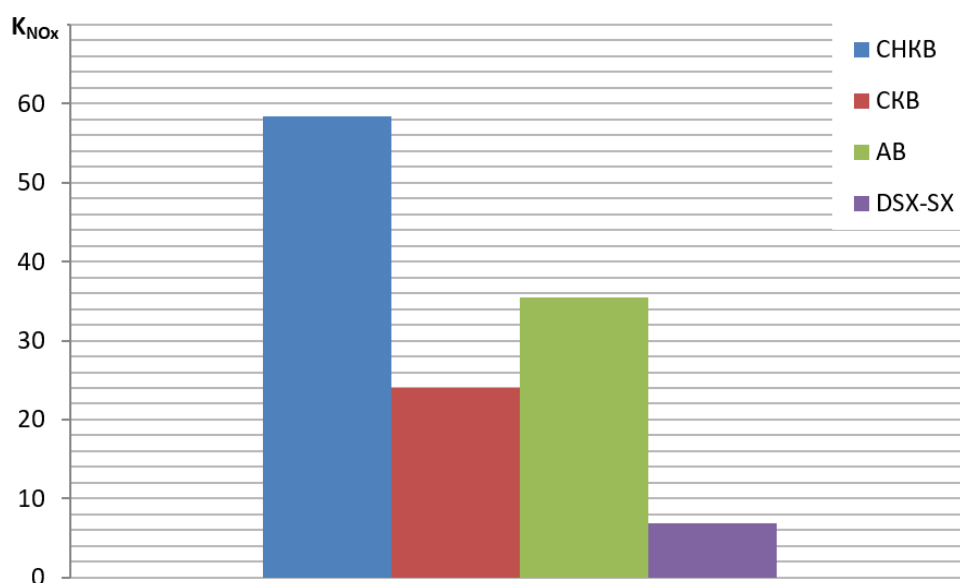


Рисунок 1 – Порівняння показників емісії оксидів азоту при різних типах азотоочисних технологій

Аналіз діаграми свідчить про суттєву різницю у здатності цих систем зменшувати викиди. Найбільше значення k_{NO_x} спостерігається при використанні селективного некаталітичного відновлення (СНКВ) – близько 60 г/ГДж, що свідчить про найнижчу ефективність очищення серед досліджених технологій.

Натомість, найменше значення емісійного показника продемонструвала технологія DESONOX – SNOX, для якої k_{NO_x} становить менше ніж 10 г/ГДж. Це підтверджує її високу ефективність у зниженні забруднення димових газів оксидами азоту.

Висновки. Результати свідчать про те, що впровадження сучасних каталітичних технологій, зокрема DESONOX – SNOX, забезпечує найнижчий рівень залишкових викидів NO_x , що є критично важливим при спалюванні високосірчастого мазуту. Значення k_{NO_x} є інформативним критерієм для вибору оптимального типу азотоочисної установки з урахуванням як екологічних, так і економічних факторів.

Список літератури:

1. Нечаєва Т.П. Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля / Т.П. Нечаєва, С.В. Шульженко, Д.П. Сас, М.В. Парасюк // Проблеми загальної енергетики. Серія «Екологічні аспекти енергетики та захист довкілля». – 2008. – №18. – С.54-60.
2. Зменшення викидів у тепловій електроенергетиці України через виконання вимог Європейського енергетичного співтовариства: зелена книга / І. Газізуллін, Л. Лозовий, О. Івахно, В. Вільямс, І. Петренко, Р. Зайка; літ. редак. Н. Цірик. – Київ: ТОВ Видавництво «Оптима», 2011. – 43 с.
3. Вербіцька І.Ю. Перспективи роботи ТЕС в умовах сучасних екологічних вимог. Вугільний форум. – Дніпро, 12 квітня 2018 р. – 17 с.
4. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. Київ, 2002.
5. Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. Київ: Мінекоресурсів України, 2001.

УДК 628.52: 504.06

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВИДАЛЕННЯ ДІОКСИДУ СІРКИ З ДИМОВИХ ГАЗІВ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Лі-фан-се Б.В., Лєдєньов М.І., ас. Беднарська І.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

li-fan-se.bohdan@lil.kpi.ua, liedienov.mikhail@lil.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Значне поширення спалювання викопного палива в енергетичному секторі та промисловості спричиняє зростання викидів діоксиду сірки (SO_2) в атмосферу. Ця сполука є основним джерелом утворення кислотних дощів і чинником деградації навколишнього середовища. Одним з найефективніших способів зменшення викидів SO_2 є застосування методів мокрої десульфуризації димових газів (WFGD), які забезпечують високий ступінь очищення та дозволяють утилізувати побічні продукти. Вибір конкретної технології визначається типом паливної сировини, обсягом викидів, економічними та екологічними вимогами. У цьому дослідженні розглянуто основні типи мокрої десульфуризації – на основі вапна, натрію та аміаку – з аналізом їх переваг, недоліків та можливостей впровадження в промислових масштабах.

Методи мокрої десульфуризації димових газів є найбільш ефективними для видалення SO_2 завдяки високій ступені очищення та можливості утилізації побічних продуктів. Незважаючи на високу витрату води та енергії, ці методи залишаються основним вибором для великих промислових об'єктів, таких як вугільні електростанції. Подальший розвиток технологій спрямований на зниження витрат ресурсів та підвищення екологічної ефективності процесів [1].

Процес мокрого очищення у скрубєрі з вапном включає очищення димових газів шляхом контакту з вапняною суспензією, що дозволяє ефективно видаляти діоксид сірки (SO_2) з викидів промислових установок і теплових електростанцій. Основна хімічна реакція полягає в поглинанні SO_2 водним розчином гідроксиду кальцію (вапна), що призводить до утворення сульфіту кальцію (CaSO_3), який потім окислюється до сульфату кальцію (гіпсу, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Недоліками даної технології є велика витрата води (15–25 кг/м³ димових газів) [2], яка необхідна для рециркуляції суспензії вапняку, що має дуже малу розчинність, велике енергетичне споживання, оброблення значної кількості стічних вод, утворення великих обсягів двоводного гіпсу.

Процес Веллмана-Лорда – це різновид процесу мокрого знесірчення димових газів (WFGD) з використанням сульфіту натрію як абсорбенту, розроблений американською компанією Wellman-Lord Company, який широко використовується в металургійній промисловості кольорових металів. У цьому процесі газ, що містить SO_2 , промивається і охолоджується водою, а SO_2 поглинається і видаляється шляхом контакту з абсорбентом Na_2SO_3 після

видалення сажі. Поглинальна рідина Na_2SO_3 в цьому процесі повторно використовується в процесі регенерації, і в процесі регенерації утворюються високі концентрації SO_2 або сірчаної кислоти [3].

У процесі Вальтера десульфуризація димових газів досягається шляхом реакції основного компонента діоксиду сірки (SO_2) з аміачною водою, що призводить до утворення сульфіту амонію, який потім окислюється до сульфату амонію. Основні етапи цього методу включають систему скрубєрів (два послідовно з'єднані скрубєри) та обробку побічних продуктів, що складається з установки окислення, буферного бака та випарника. Процес Вальтера може використовуватися для очищення димових газів із максимальним об'ємним потоком до $0,23 \cdot 10^6$ $\text{nm}^3/\text{год}$ від спалювання палива з вмістом сірки до 1,2% та досягає ефективності видалення діоксиду сірки на рівні 90%. У випадках, коли потоки димових газів більші, для десульфуризації використовують дві або більше ліній [4].

Висновок. Методи мокрої десульфуризації димових газів залишаються найефективнішими технологіями для видалення діоксиду сірки (SO_2) з промислових викидів завдяки високій ефективності очищення та можливості утилізації побічних продуктів. Серед розглянутих методів найбільш поширеним є скрубєр з вапняною суспензією, який забезпечує надійне очищення, але потребує значних ресурсів води й енергії. Процес Веллмана-Лорда характеризується високою ефективністю та можливістю регенерації абсорбенту, що знижує експлуатаційні витрати. Метод Вальтера, у свою чергу, забезпечує високу ефективність при очищенні середніх та великих обсягів димових газів і дозволяє отримувати сульфат амонію як побічний продукт. Подальший розвиток технологій мокрої десульфуризації спрямований на підвищення енергоефективності, зменшення водоспоживання та інтеграцію процесів утилізації продуктів реакції.

Список літератури:

1. 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. 55-73.
2. Будя Ю.С. Аналіз екологічних показників ТЕС при використанні різних видів палива: магістерська дис.: 144 «Теплоенергетика» / Будя Юрій Сергійович. – Київ, 2024. – 91 с.
3. Poullikkasa A. Review of design, operating, and financial considerations in flue gas desulfurization systems / A. Poullikkasa // Energy Technology & Policy. – 2015. – Vol. 2, Is.1. – P. 92-103.
4. Notarnicola M. Enhancing the recovery of gypsum in limestone-based wet flue gas desulfurization with high energy ball milling process / M. Notarnicola, A. Molino, S. Gisi // Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – Vol. 109. – P. 117-129.

УДК 656.022.8

ПОШУК ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ. ВИЯВЛЕННЯ РИЗИКІВ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ЇХНІМ ВПРОВАДЖЕННЯМ

Ібрагім А.М., д.т.н., проф. Клевцов К.М.
Херсонська державна морська академія, м. Херсон
arturibrahim97@gmail.com
Науковий керівник: д.т.н., проф. Клевцов К.М.

Розвиток транспортного сектору та оптимізація ланцюгів постачання, зокрема завдяки контейнеризації, є важливим для ефективного товарообміну. Сучасна логістика все більше орієнтується на мультимодальні перевезення, що забезпечують доставку "від дверей до дверей" одним оператором.

Актуальність теми. В умовах збільшення вартості енергоносіїв та посилення екологічних вимог, оптимізація енергоефективності морських вантажоперевезень набуває особливої значущості. Міжнародна Морська Організація (ІМО) є ключовим регулятором у цій сфері, а положення Додатку VI до Міжнародної конвенції MARPOL визначають вимоги до енергоефективності судноплавства. Він постановляє підвищити власну енергоефективність у короткостроковій перспективі, щоб зменшити викиди парникових газів. За даними ІМО, на морське судноплавство припадає приблизно 3% глобальних викидів цих газів [1].

Метою даного дослідження є аналіз шляхів підвищення енергоефективності морських перевезень з урахуванням економічних та екологічних чинників. Також метою є визначення ризиків від впровадження даних заходів.

Методи дослідження. У роботі використано метод бібліометричного огляду для систематизації існуючих знань та виявлення прогалин у області, присвяченій енергозбереженню та зменшенню викидів парникових газів на морському транспорті.

Виклад основного матеріалу. Дослідження теоретичних основ міжнародних морських мультимодальних перевезень дозволило нам виокремити основні заходи щодо підвищення енергоефективності морського транспорту та зменшення ним шкідливих викидів.

Одним із ефективних підходів є зниження швидкості суден ("Повільне плавання"), що дозволяє скоротити споживання палива та викиди. Оптимізація маршрутів за допомогою штучного інтелекту також сприяє підвищенню енергоефективності. Важливо враховувати вплив зниження швидкості на економічні показники та морехідні якості судна.

Модернізація енергетичної установки судна є іншим напрямком, проте очікуване скорочення викидів від таких заходів може бути відносно невеликим. Модернізація конструкції судна, наприклад, із застосуванням цибулинних носових елементів, забезпечує помірний ефект.

Використання альтернативних джерел енергії, таких як ротори Флеттнера, вітрила-крила та альтернативні види палива (біопаливо, водень, аміак, електроенергія), є перспективним напрямком. Кожен з них має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати.

Енергоефективність суден залежить від зовнішніх факторів та експлуатаційних параметрів. Оптимізація маршруту та диференту судна є важливими стратегіями для зменшення споживання палива [2, 3].

Ще одним із ефективних заходів енергозбереження і зниження викидів парникових газів є додавання у судновий дизель спеціальних паливних добавок, присадок. Згідно з даними дослідження, присадки є важливим інструментом у стратегії сталого розвитку морського транспорту, забезпечуючи оптимізацію використання наявних ресурсів на противагу впровадженню принципово нової інфраструктури. Встановлено, що присадки сприяють поліпшенню характеристик палива та процесів його згоряння, що призводить до зниження витрат і зменшення викидів шкідливих речовин. Виділено декілька категорій присадок, включаючи сполуки, що підвищують цетанове число для оптимізації займання дизельного палива, покращують мастильні властивості та знижують викиди оксидів азоту (NO_x), а також нітрогеновмісні сполуки та похідні сукцинового ангідриду, що проявляють детергентні властивості. Етери та пероксиди ефективно підвищують цетанове число, оптимізуючи якісні показники палива, збільшуючи ресурс двигуна та мінімізуючи негативний вплив на екосистему. Крім того, підвищення цетанового числа сприяє зниженню шумності процесу згоряння, димоутворення та полегшує запуск двигуна, особливо за умов низьких температур. Слід зазначити, що ефективність застосування присадок значною мірою залежить від конструктивних особливостей двигуна та умов його експлуатації. Тому дослідження цієї залежності може бути темою майбутніх емпіричних експериментів [4].

Ризики в транспортних процесах та їх зв'язок з енергоефективністю. Впровадження енергоефективних заходів для суден має не тільки переваги, але й низку операційних, економічних, технологічних ризиків, а також ризиків виникнення надзвичайних ситуацій. Нами досліджено наступні:

1. Для заходів щодо оптимізації форми корпусу існує ризик зниження вантажопідйомності, збільшення витрат на проєктування та будівництво, складність ремонту.

2. Для застосування альтернативних видів палива – ризик недостатньої інфраструктури заправки, висока вартість палива, необхідність перепідготовки персоналу, питання безпеки.

3. Для складних технологічних систем – ризик високої вартості впровадження та обслуговування, необхідність спеціалізованого персоналу, ризик виходу з ладу та простоїв.

4. Підвищена ймовірність пожеж або вибухів при використанні альтернативних палив.

5. Відмови складних енергетичних систем у критичних умовах.

6. Недостатня готовність екіпажу до аварійних дій з новим обладнанням.

7. Вразливість окремих технологій до екстремальних погодних явищ.

8. Непередбачувані наслідки інтеграції нових та існуючих систем.
9. Ускладнення евакуації, неефективність традиційних систем пожежогасіння для нових видів палива.
10. Корозія або руйнування конструкцій, спричинені новими матеріалами.
11. Кіберзагрози для систем управління енергоефективністю та безпеки при обслуговуванні складного обладнання.

Проте нехтування заходами щодо впровадження енергозбереження в морському транспорті мультимодальних перевезень, згідно наших досліджень, також породжує низку взаємопов'язаних економічних ризиків. Серед яких:

1. Зростання операційних витрат і зниження конкурентоздатності через вищі транспортні витрати.
2. Ризики екологічних штрафів та погіршення іміджу через недотримання екологічних норм та очікувань суспільства.
3. Зростання залежності від волатильності цін на паливо.
4. Збільшення ймовірності технічних несправностей та простоїв, що призводить до затримок вантажів. Як наслідок, можлива втрата страхового покриття або збільшення страхових премій.
5. Ризик невідповідності майбутнім екологічним стандартам та обмеження доступу до певних портів і маршрутів.

Висновки. Зважаючи на зростаючу вартість енергоресурсів та посилення екологічних вимог, впровадження енергозберігаючих технологій є ключовим напрямком розвитку морського транспорту. Однак, цей процес повинен тримати крихку рівновагу. Адже поряд з очевидними перевагами, такими як зменшення енергоспоживання та викидів шкідливих речовин, необхідно ретельно оцінювати та ефективно управляти ризиками, що супроводжують впровадження нових технологій та заходів. Майбутні наукові дослідження мають зосередитися на розробці дієвих методологій оцінки та мінімізації цих ризиків, що є критично важливим для забезпечення сталого розвитку морського транспорту.

Список літератури:

1. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (last access: 06.05.2025). – Title from the screen.
2. Barreiro J. Review of ship energy efficiency / J. Barreiro, S. Zaragoza, V. Diaz-Casas // Ocean engineering. – 2022. – Vol. 257. – 111594.
3. Kondratenko A.A. Existing technologies and scientific advancements to decarbonize shipping by retrofitting / A.A. Kondratenko, M. Zhang, S. Tavakoli, E. Altarriba, S. Hirdaris // Renewable and sustainable energy reviews. – 2025. – Vol. 212. – 115430.
4. Elkelawy M. Enhancing Diesel Engine Power Plant Efficiency and Cutting Emissions with Commercial Fuel Additives in Generator Systems / M. Elkelawy, M. Aly Farag, H.E. Seleem // Pharos Engineering Science Journal. – 2025. – Vol. 2, no. 1. – P. 37–46.

УДК 620.9

ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ФЕС Й ТЕПЛОВОГО НАСОСУ ДЛЯ ХОСТЕЛУ

Жук Д.В., к.т.н., доц. Погребняк І.Ф.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький

pohrebnyak.iryana@kntu.edu.ua

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

У всі часи люди прагнули нових емоцій та зняття втоми. Одним із джерел задоволення цих потреб були подорожі та відпочинок. Під впливом суспільно-політичних чинників туризм як сфера задоволення потреб людини, яка подорожує, перетворився на індустрію - потужний господарський комплекс національних економік, що функціонує у тісному взаємозв'язку з природним середовищем, економічною системою, суспільством у цілому. Індустрія туризму відіграє істотну переважно позитивну соціально-економічну роль у розвитку національної економіки, а тому є об'єктом регуляторного впливу держави.

Готельне господарство тісно пов'язане з розвитком туризму. Ці дві галузі взаємно впливають одна на одну. Готелі можна вважати найважливішим елементом інфраструктури туристичного бізнесу, а туризм - одним з напрямів реалізації готельних послуг [1, 2].

Об'єктом дослідження є хостел – форма туристичного розміщення, яка, як правило, дешевша за готель і з меншою кількістю послуг. Хостели, як і інші форми туристичного розміщення, є споживачами як енергії, так і води. Метою встановлення ФЕС є не лише зменшення витрат, а також можливість у випадку відсутності електропостачання, забезпечити роботу теплового насоса.

Вартість такого проєкту складається з ціни обладнання (сонячні панелі, інвертор, система кріплень, кабелі, теплові насоси, бак-акумулятор) й вартості монтажних робіт [3].

Вироблена по місяцях електрична енергія наведена на рис. 1. Річна генерація становить 17,7 МВт·год, сума за спожиту електроенергію 146 тис. грн.

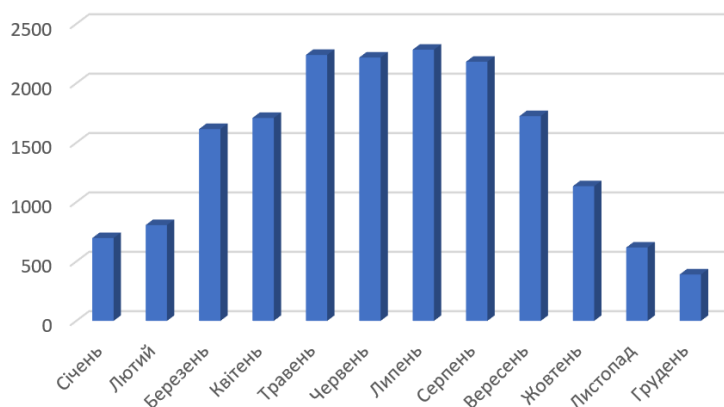


Рисунок 1 – Генерація електроенергії, кВт·год

Під час економічного обґрунтування доцільності такого проєкта окрім вартості самого проєкту маємо обов'язково враховувати витрати на ремонти: поточні, які проводяться один раз на рік (згодом ефективність ФЕС зменшується, а враховуючи термін експлуатації панелей 25 років, таких ремонтів буде 24) та капітальні, які проводяться раз на десять років. Вартість проєкту становить 1426186,10 грн. Вартість виробленої електроенергії ФЕС представлена на рис. 2.

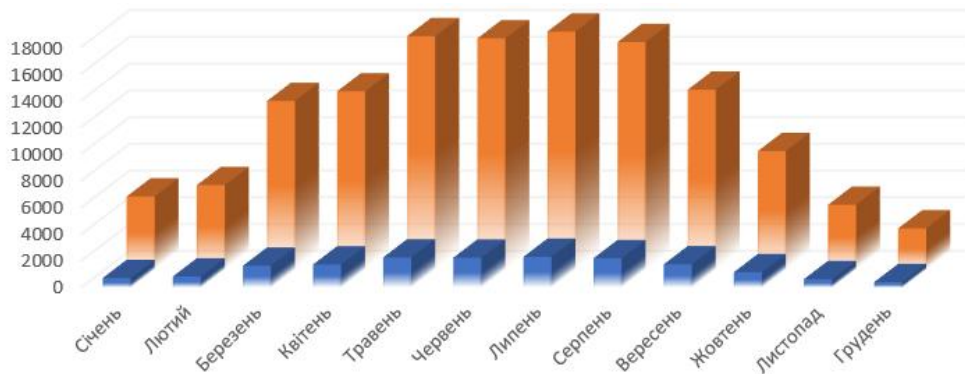


Рисунок 2 – Вартість виробленої електроенергії ФЕС:

■ – генерація, кВт·год; ■ – сума за спожити електроенергію, грн.

Таблиця 1

Термін окупності системи

Рік	Економія (ФЕС)	Економія (опалення та ГВП)	Загальна економія	Вартість	Окупність
1	146124	129104,18	275228,18	1440447,96	-1165219,78
2	292248	258208,36	520456,36	1454709,82	-934253,46
3	438372	387312,54	825684,54	1468971,68	-643287,14
4	584496	516416,72	1100912,72	1483233,54	-382320,82
5	730620	645520,90	1376140,90	1497495,4	-121354,50
6	876744	774625,08	1651369	1511757,26	139611,74

За результатами розрахунків, окупність проєкту становить шість років.

Впровадження комбінованих систем дозволить формам туристичного розміщення зменшити фінансові витрати на електроенергію, а також зробити вагомий внесок у напрямі екологічно чистого бізнесу шляхом зниження викидів вуглецю.

Список літератури:

1. Маркетинг готельних послуг / С.В. Скибінський [та ін.] – Львів: Видавництво Львівської комерційної академії, 2000. – 246 с.
2. Мельниченко О.А. Особливості розвитку індустрії туризму в Україні: монографія / О.А. Мельниченко, В.О. Шведун. – Харків: Вид-во НУЦЗУ, 2017. – 153 с.
3. Сайт компанії Teplosolar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://teplosolar.com.ua/>. – Назва з екрану.

УДК 628.52: 504.06

МЕТОДИ НАПІВСУХОГО ТА СУХОГО ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ: ШЛЯХ ДО ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Баби́ч А.І., Прище́па Е.П., ас. Бедна́рська І.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

babich.andrey@lil.kpi.ua, pryschepa.eduard@lil.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

В умовах сучасної екологічної кризи зростає необхідність впровадження ефективних технологій для зменшення викидів забруднюючих речовин у атмосферу. Одними з найбільш актуальних є методи очищення димових газів від оксидів сірки, хлору, фтору, а також важких металів. Ці технології базуються на застосуванні сорбентів, які поглинають шкідливі компоненти газових викидів, сприяючи зниженню їх концентрацій до безпечних рівнів. Напівсухе та сухе очищення димових газів, що використовують розпилення водних або сухих сорбентів, є одними з найбільш ефективних способів боротьби із забрудненням атмосферного повітря.

Системи напівсухого очищення працюють на основі розпилення водної суспензії вапна або інших лужних речовин у спеціальних реакторах. Забруднюючі гази, такі як SO_2 , HCl , HF , вступають у реакцію з адсорбентом, утворюючи тверді солі, які осідають і видаляються. Реактор, в свою чергу, виконує функції абсорбера та сушильної камери. Популярні системи, такі як ESOX, GSA, Niro Atomizer, досягають ефективності очищення до 95%, використовуючи мінімальні кількості рідини, що робить цей метод економічно доцільним [1].

Метод сухого очищення, що застосовує інжекцію тонкодисперсного сухого сорбенту, зокрема вапняного або натрієвого, є простим та економічно вигідним. Сорбент подається безпосередньо в димовий потік або реакційну камеру, де він поглинає забруднюючі гази та частки пилу. Хоча цей метод має меншу ефективність (приблизно 70–85%), він є доступним через низькі капітальні витрати та простоту реалізації [2,3].

Процес LIFAC є вдосконаленою версією DSI, яка комбінує подачу сухого вапна в димовий газ із зволоженням реактора через розпилення води. Завдяки зволоженню частинки сорбенту активуються, що підвищує їх здатність до хімічного зв'язування забруднюючих речовин. Цей метод дозволяє досягти ефективності очищення до 90%, зберігаючи простоту й гнучкість використання [5].

Процес Lurgi CFB заснований на використанні реактора з циркулюючим киплячим шаром (CFB), в який подається вапняковий сорбент і розбризкується вода. Це забезпечує інтенсивне перемішування сорбенту з димовим газом, що збільшує контакт між ними. Цей метод відрізняється високою ефективністю (до 98%), особливо в контексті зниження викидів діоксиду сірки [4].

Технологія адсорбції активованим вугіллям використовується для уловлювання важких металів, таких як Hg, Cd, Pb, а також органічних сполук, зокрема діоксинів і фуранів. Активоване вугілля вводиться в потік диму в сухому вигляді, де поглинає токсичні речовини. Потім частинки сорбенту, разом із поглиненими забрудниками, видаляються через фільтри. Цей метод демонструє високу ефективність навіть при низьких концентраціях забруднюючих речовин, особливо в комбінації з рукавними фільтрами [6].

Висновок. Технології напівсухого та сухого очищення димових газів відіграють ключову роль у зменшенні екологічного навантаження на атмосферу. Кожен з методів має свої переваги та обмеження, проте їх ефективність та економічність дозволяють здійснювати комплексне очищення димових газів на різних етапах виробничих процесів. Інтеграція таких систем у промисловість сприяє значному зниженню викидів шкідливих речовин, що є важливим кроком до збереження навколишнього середовища та покращення якості повітря.

Список літератури:

1. Брусиловський І.В. Технології очищення газів у промислових системах / І.В. Брусиловський. – Київ: Техніка, 2005. – 320 с.
2. Котельников В.П. Промислова екологія та очищення викидів / В.П. Котельников, Ю.О. Лебедєв. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 280 с.
3. Петров О.М. Сучасні методи уловлювання золи на теплових електростанціях / О.М. Петров, В.І. Сидоренко // Енергетика та екологія. – 2018. – №3(45). – С. 12-20.
4. Матеріали компанії ANDRITZ AG. Semi-dry flue gas cleaning systems. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.andritz.com>. – Назва з екрана.
5. Air Pollution Control Technology Fact Sheet: Dry Sorbent Injection (DSI) [Electronic resource] / EPA (U.S. Environmental Protection Agency). – Access mode: <https://www.epa.gov/om/ukrainsni-instrumenty/rukavni-filtri-priznachennya-i-printsip-diyi/>. – Title from the screen.
6. Рукавні фільтри. Призначення і принцип дії. [Електронний ресурс] / АВ Technologies. – Режим доступу: <https://abtechnologies.com.ua/korysni-instrumenty/rukavni-filtri-priznachennya-i-printsip-diyi/>. – Назва з екрана.

УДК 620.9

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДАХОВОГО ТИПУ В М. ХЕРСОН

Пейкрішвілі М.Ш., к.т.н., доц. Погребняк І.Ф.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький

pohrebnyak.iryana@kntu.edu.ua

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

В умовах сучасного світу, де енергетична безпека та незалежність стають все більш важливими факторами розвитку держав, питання відновлюваних джерел енергії набувають нової актуальності. Для України, яка зазнала й продовжує зазнавати значних втрат енергетичної інфраструктури через війну з росією, розвиток сонячної енергетики стає не лише питанням екологічної відповідальності, а й національної безпеки [1].

Використання даху багатоповерхового будинку для розміщення на ній ФЕС є дуже гарним рішенням, оскільки дана площа не використовується, а земельні ресурси є обмеженими і це питання стоїть гостро. Використання саме даху об'єкту має декілька вагомих переваг, а саме: відсутнє затінення з боку рослинності або інших споруд; ризик пошкодження людиною відсутній, оскільки територія є недоступною для сторонніх; забруднення пилом – нижче.

Розрахунки проводилися для п'ятиповерхового будинку в м. Херсон. Для створення максимально ефективного проекту було розглянуто декілька варіантів з використанням однотипного обладнання.

Кількість генерованої електричної енергії наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Виробництво енергії системою (кВт·год)

Місяць	Варіант 1 (нахил 33°, азимут 180°, горизонтальне розташування панелей)	Варіант 2 (нахил 46°, азимут 180°, вертикальне розташування панелей)	Варіант 3 (нахил 33°, азимут 180°, горизонтальне розташування панелей, на підвищеному рівні)
Січень	3 119	3 525	5 040
Лютий	5 580	6 017	7 948
Березень	7 978	9 491	10 999
Квітень	9 896	11 348	13 614
Травень	11 831	13 036	16 266
Червень	11 233	12 148	15 444
Липень	11 762	12 850	16 175
Серпень	12 203	13 891	16 794
Вересень	9 449	11 303	13 039
Жовтень	7 683	8 508	10 725
Листопад	3 570	4 010	5 540
Грудень	2 548	2 758	4 126
Разом:	96 852	108 885	135 710

Кількість переданої в мережу електричної енергії після покриття власного споживання за усіма варіантами наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Кількість переданої в мережу електричної енергії після покриття власного споживання (кВт·год)

Місяць	Варіант		
	1	2	3
Січень	2 955	3 361	4 876
Лютий	5 416	5 853	7 784
Березень	7 814	9 327	10 835
Квітень	9 732	11 184	13 450
Травень	11 667	12 872	16 102
Червень	11 069	11 984	15 280
Липень	11 598	12 686	16 011
Серпень	12 039	13 727	16 630
Вересень	9 285	11 139	12 875
Жовтень	7 519	8 344	10 561
Листопад	3 406	3 846	5 376
Грудень	2 384	2 594	3 962
Разом:	94 884	106 917	133 742

Енергоспоживання об'єкту є низьким, тому використовуючи будь-який з розглянутих варіантів ФЕС, отримаємо достатню кількість енергії для покриття власних потреб та продажу енергії в мережу за «зеленим» тарифом.

Капітальні витрати на впровадження проєкту склали [2]:

Варіанти	1	2	3
Капітальні витрати, грн	2 060 497	2 362 755	2 616 261

Щорічні поточні витрати на обслуговування проєкту становитимуть:

Варіанти	1	2	3
Експлуатаційні витрати, грн/рік	105 085	120 500	133 429

Сума доходу, яка отримується від продажу електричної енергії за рік за «зеленим» тарифом склала:

Варіанти	1	2	3
Сума, грн	639 877	721 023	901 925

Прибуток, отриманий за рік в результаті продажу електричної енергії за «зеленим» тарифом та економії за рахунок покриття власних потреб становитиме:

Варіанти	1	2	3
Сума, грн	430 507	483 421	618 639

Простий термін окупності по варіантах проєкту фотоелектричної станції становить:

Варіанти	1	2	3
Простий термін окупності, років	4,7	4,81	4,17

Найменший простий термін окупності має третій варіант проєкту.

У табл. 3 представлено зведені показники ефективності проєкту для усіх варіантів.

Таблиця 3

Зведені показники ефективності проєктів

Характеристика	Варіанти		
	1	2	3
Капітальні витрати, грн	2 060 497	2 362 755	2 616 261
Чистий дисконтований дохід, грн	3 563 529	3 993 978	5 091 840
Чиста поточна цінність, грн	1 503 031	1 630 623	2 475 578
КВ	2 060 497	2 362 755	2 616 261
ТО, років	7,144	7,405	6,008
Рентабельність	21,29	20,81	23,96
ВНП, %	21,10	20,60	23,80
IP	1,729	1,690	1,946
	IP>1	IP>1	IP>1
	проект ефективний	проект ефективний	проект ефективний

Під час аналізу показників ефективності запропонованих проєктів, варіант № 3 є найбільш економічно доцільним, оскільки термін окупності складає 6 років у порівнянні з двома іншими варіантами. Реалізація проєкту потребує капітальних вкладень майже 2,62 млн грн. та приносить прибуток у розмірі 2,475 млн. грн. Проєкт є найбільш стабільним, оскільки має найбільший показник внутрішньої норми прибутковості 23,8 %.

Список літератури:

1. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні до 2030 року [Електронний ресурс] / Репортер [Сайт]. – Режим доступу: <https://report.if.ua/socium/perspektyvy-rozvytku-sonyachnoyi-energetyky-v-ukrayini-do-2030-roku/> (дата звернення 14.04.2025). – Назва з екрану.

2. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проєктах та роботах: Навч. пос./ В.О. Козловський. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 75 с.

УДК 628.52: 504.06

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ

Климюк А.С., Куляпін Д.В., Онищук М.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

klymiukanastasiia@lil.kpi.ua, kuliapin.danil@lil.kpi.ua,

onyshchuk.nikita@lil.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Зростання масштабів енергетичного виробництва супроводжується збільшенням кількості викидів шкідливих речовин в атмосферу. Оксиди азоту (NO_x), що утворюються внаслідок спалювання палива та випускається з автомобілів, є одним із найнебезпечніших забруднювачів, які спричиняють кислотні дощі, смог та мають токсичний вплив на людину і довкілля. Для зниження екологічного навантаження розроблено низку технологій очищення димових газів, серед яких провідне місце займають селективне каталітичне відновлення (СКВ), селективне некаталітичне відновлення (СНКВ), адсорбція активованим вугіллям та комплексна технологія DESONOX/SNOX [1].

Селективне каталітичне відновлення (СКВ) - це високоефективна технологія, яка базується на хімічному перетворенні NO_x у безпечний азот (N_2) за допомогою аміаку або сечовини на поверхні каталізатора при температурі 250–450 °С. Конструкція СКВ включає систему зберігання реагенту, дозуючі насоси, точки впорскування та каталітичний реактор. Процес є високоселективним, тобто реагент взаємодіє лише з оксидами азоту, не утворюючи побічних сполук. Основними перевагами СКВ є стабільність, гнучкість, ефективність (до 95%) і утворення лише безпечних продуктів – азоту і води. Водночас недоліками є висока вартість впровадження, потреба у точному температурному режимі та чутливість до складу газового потоку [1, 2].

Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) є спрощеним аналогом СКВ, що не потребує використання каталізаторів і здійснюється при вищих температурах (800–1100 °С). Основний реагент – аміак або сечовина – вводиться безпосередньо у зону високих температур, де відбувається термічне перетворення NO_x у азот. Перевагами СНКВ є простота конструкції, відсутність каталізаторів, відносно низька вартість і висока надійність системи (коефіцієнт готовності – 0,99). Проте ефективність процесу значно нижча (35-75%), а вузький температурний діапазон створює ризик недостатнього очищення або утворення вторинних продуктів, зокрема "амонійного проскоку" [3].

Іншим ефективним методом є адсорбція активованим вугіллям, що дозволяє вловлювати NO_x та інші токсичні домішки (ртуть, діоксини, фурані) завдяки фізичному та хімічному зв'язуванню на поверхні сорбенту. Активоване вугілля має велику питому площу поверхні (до 1500 м²/г) і забезпечує ефективне очищення після охолодження газів до 140–200 °С. До переваг методу

належать універсальність, компактність, простота інтеграції та можливість регенерації сорбенту. Водночас ємність адсорбції обмежена, а відпрацьоване вугілля потребує утилізації [4, 5].

Комплексна технологія DESONOX (SNOX) дозволяє одночасно очищати гази від оксидів сірки та азоту з подальшим виробництвом сірчаної кислоти як корисного побічного продукту. Процес включає кілька етапів: фільтрацію твердих частинок, селективне каталітичне відновлення NO_x , каталітичне окислення SO_2 до SO_3 та конденсацію кислоти. Переваги – надвисока ефективність, відсутність вторинних відходів, енергетична доцільність і виробництво промислової сировини. Проте реалізація технології потребує значних інвестицій, складної інфраструктури та високого рівня контролю [5].

Короткі характеристики зазначених методів наведемо у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів азотоочистки

Технологія	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Ефективність (%)
СКВ	Каталітичне відновлення з NH_3 /сечовиною	Висока ефективність, гнучкість, безпечний продукт	Висока вартість, чутливість до параметрів	90–95
СНКВ	Термічне відновлення без каталізатора	Простота, відсутність каталізаторів	Вузький температурний режим, амонійний проскок	35–75
Активоване вугілля	Адсорбція на поверхні сорбенту	Компактність, регенерація, універсальність	Обмежена ємність, утилізація сорбенту	До 80
DESONOX/SNOX	Каталітичне $\text{DeNO}_x + \text{DeSO}_x$	Комплексне очищення, корисний продукт	Складність, висока вартість, потреба в інфраструктурі	>95

Висновок. Зростання масштабів енергетичного виробництва зумовлює необхідність впровадження високоефективних технологій очищення димових газів, зокрема для зменшення викидів оксидів азоту (NO_x), які становлять серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людини. Розглянуті методи – селективне каталітичне відновлення (СКВ), селективне некаталітичне відновлення (СНКВ), адсорбція активованим вугіллям та комплексна технологія DESONOX/SNOX – мають різний рівень ефективності, складності впровадження та економічної доцільності.

СКВ є найефективнішим і найнадійнішим методом для досягнення високого рівня очищення (до 95 %), однак потребує значних витрат і точного дотримання температурного режиму. СНКВ, незважаючи на нижчу ефективність, є привабливим через простоту та низьку вартість. Адсорбція активованим вугіллям забезпечує додаткову універсальність і може використовуватися як доповнення до основних методів, особливо при вловлюванні супутніх шкідливих компонентів. Технологія DESONOX/SNOX демонструє найвищу ефективність очищення та економічну вигоду через можливість отримання сірчаної кислоти, проте її впровадження доцільне лише для великих енергетичних або промислових підприємств.

Отже, вибір оптимальної технології має базуватися на поєднанні екологічних вимог, технологічних особливостей джерела викидів та економічних можливостей підприємства.

Список літератури:

1. Розрахунок викидів забруднюючих речовин при спалюванні палива: метод. рек. до викон. розрахункової роботи для студ. напрямів підготовки «Теплоенергетика» [Електронний ресурс]/Уклад.: В.І Шкляр, В.В. Дубровська. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 32 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/4a419882-979d-42f9-a9cc-d1ea826c6784/content>. – Назва з екрана.
2. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок Методика визначення [Електронний ресурс]. Чинний від 01.07.2002. – Режим доступу: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/vikidi_zabrudnyuvalnikh_rechovin-3-27842.pdf. – Назва з екрана.
3. Екологічні проблеми енергетики. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт (частина 1) студентами спеціальностей 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» [Електронний ресурс]/ А.Г. Рудченко. – Дніпро: Національний гірничий університет, 2017. – 44 с. – Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/94e32829-7a22-4ae0-8ac2-aba7a34a9d29/content>. – Назва з екрана.
4. Техноекологія: методичні рекомендації до написання та оформлення курсової роботи для курсантів і студентів спеціальності 101 «Екологія» [Електронний ресурс] / Укладач: М.В. Сарапіна – Х. : НУЦЗУ, 2017. – 51 с. – Режим доступу: http://univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/3655/7._Kursova_robota.PDF. – Назва з екрана.
5. ДСТУ 4169:2003 Стиснене повітря. Частина 1. Забруднювачі та класи чистоти (ISO 8573-1:2001, MOD).[Чинний від 2004-07-01]/ 3 Поправкою (ПС № 1-2005).Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 10 с.

УДК УДК 330.341.1:620.9:658:26

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ: ЖИТТЄВА НЕОБХІДНІСТЬ ТА СТРАТЕГІЯ РОЗВИТКУ

Викладач вищої кваліфікаційної категорії, викладач-методист Булах І.І.,
викладач-спеціаліст Короташ А.І.

Відокремлений структурний підрозділ

Уманський фаховий коледж технологій та бізнесу

Уманського національного університету садівництва, м.Умань

bulah.ira123@gmail.com, iryshakarl14@gmail.com

Енергоефективність – це раціональне споживання усіх енергетичних ресурсів шляхом меншого їх використання для забезпечення будівель або технологічних процесів на виробництві тією ж кількістю енергії. Або ж, як визначає її закон, «кількісне співвідношення між роботою, послугами, товарами або енергією на виході та витраченою енергією на вході».

Варто розуміти різницю між енергоефективністю та енергозбереженням. Якщо ви вимкнете світло, то заощадите енергію, проте почитати книгу вам не вдасться – це енергозбереження. Якщо ж замінити лампу розжарювання на світлодіодну, то вам вдасться і почитати, і використати для цього менше енергії – і оце вже енергоефективність.

Енергія не береться нізвідки – в Україні вона виробляється переважно із викопного палива. Половину електроенергії до повномасштабного вторгнення росії постачали атомні електростанції, які в процесі роботи продукують тони радіоактивних відходів. Ще третина та більша частина тепла для опалення – результат спалювання викопного палива, що забруднює повітря і посилює зміну клімату. Тож чим менше енергії ми споживаємо, тим менше шкоди довкіллю завдаємо і тим легше буде поступово замінювати брудне паливо більш чистими та безпечними відновлюваними джерелами енергії (сонце, вітер, біомаса тощо).

Економія ресурсів – це ще й економія коштів і стосується вона не лише платіжок. Нинішні тарифи в Україні штучно занижені і компенсуються коштом державного бюджету – наприклад, за рахунок субсидій у вугільну галузь. Тобто витрачаються наші з вами кошти, просто у інший спосіб. І така ситуація не триватиме вічно і рано чи пізно тарифи зростатимуть, тож енергоефективні заходи допоможуть підготувати людей до вищих цін, аби вони не так сильно вдарили по наших гаманцях.

Енергоефективність – це одна із основ енергетичної політики ЄС, адже там активно націлені на зменшення свого впливу на довкілля та клімат. І Україна як майбутня членкиня Євросоюзу має грати за тими ж правилами, що й інші країни – тобто так само прагнути найвищих стандартів ефективності.

Ну і наостанок, енергоефективність – це ще й про наші з вами особистий комфорт. Адже кому не хочеться мешкати там, де з гарячого крану тече дійсно гаряча вода, а не ледь тепленька, а в зимові холоди вас не турбують холодні

стіни й протяги. Не кажучи вже про те, що усвідомлювати своє дбайливе ставлення до довкілля та здоров'я людей приємно ще й для нашої совісті.

Енергія – в нашому випадку тепло й електрика – оточує нас усюди, тому й потенціал для розвитку енергоефективності можна знайти на кожному кроці: починаючи із побутових звичок і завершуючи перебудовою усієї енергосистеми країни.

На особистому рівні кожен та кожна з нас може знайти простір для енергоефективності. Найпростіше це побачити на прикладі побутової техніки – уся вона має маркування класу енергоефективності. Чим він вищий – тим менше енергії той чи інший пристрій споживає для виконання тієї самої роботи, що й інший прилад із нижчим класом. Та навіть зі старою технікою можна поводитися ефективніше: наприклад, розморожувати холодильник за потреби, нагрівати лише необхідну кількість води в чайнику чи повністю наповнювати пральну машинку, коли перете одяг [1].

Крім цього, є ще й заходи із термомодернізації – різні способи покращити своє житло так, щоб воно краще зберігало тепло взимку чи прохолоду влітку. Це заміна вікон на більш ощадні, утеплення входних дверей, встановлення спеціальних систем вентиляції тощо.

Та багато таких заходів неможливо зробити самотужки і потрібна участь усіх сусідів. Наприклад, утеплювати фасад будинку чи замінювати систему опалення на таку, що дозволить регулювати температуру, потрібно одразу в усьому під'їзді. А ще більш масштабні заходи – наприклад, модернізація системи, що доставляє тепло чи електрику від станції до вашого дому – залежать вже не від простих споживачів. Тут у гру має вступити національна влада, що розроблятиме необхідні плани та проекти, і місцева влада спільно з компаніями-управительками, які ці проекти мають реалізовувати. Про більш масштабні заходи і поговоримо далі.

В Україні налічується 9,2 млн житлових будинків, які відповідальні за 28,4% кінцевого споживання енергії. Більшість із них побудовані ще за радянських часів, тож з енергоефективністю в них не дуже – вони витрачають у 2-3 рази більше енергії, ніж будівлі в ЄС. Тому тут є колосальний потенціал для енергоефективності і до повномасштабної війни ця сфера пройшла значний шлях у цьому напрямку.

У 2015 році новий закон надав право співвласникам багатоквартирного будинку обирати форму управління – тобто обслуговувати його самостійно, об'єднуватися в ОСББ чи наймати спеціальних управителів. А у 2017-му інший закон започаткував «Фонд енергоефективності», який допомагає із фінансуванням комплексних енергоефективних рішень за найкращими європейськими практиками.

Завдяки цьому мешканці будинків з ОСББ можуть проводити масштабні енергоефективні заходи – наприклад, модернізувати систему опалення в усьому будинку чи теплоізолювати дах, стіни й підвал – та отримувати від Фонду до 70% коштів за програмою «Енергодім». Завдяки ній вдалося реалізувати понад 800 таких проектів.

У 2014-2021 роках існувала також інша фінансова програма «теплі

кредити» – вона компенсувала частину витрат окремим родинам на котли та енергоефективне обладнання чи матеріали. Однак врешті цю програму згорнули, адже заходи за нею були фрагментарними, а якість робіт не контролювалася. Натомість «Фонд енергоефективності» підтримує більш комплексні та ефективні заходи, які однак, доступні не всім, а лише будинкам з ОСББ.

Повномасштабна війна поставила ще один виклик перед галуззю енергоефективності. Тепер необхідно дбати ще й про енергоефективне відновлення зруйнованих будинків. Для цього «Фонд енергоефективності» у листопаді минулого року запустив пілотний етап програми «ВідновиДІМ». За нею держава повністю компенсує ОСББ енергоефективний ремонт пошкоджених росіянами будинків – наприклад, заміну вікон чи ремонт даху.

Крім державних, є ще й місцеві програми підтримки енергоефективності. Вони надають додаткову компенсацію з місцевих бюджетів на заходи, передбачені державними програмами.

У 2020 році кінцеве споживання енергії сектором послуг (комерційними та бюджетними будівлями) становило 10,2 % загального кінцевого енергоспоживання в Україні. Це не найбільший споживач енергії, але згідно з іншим дослідженням, українські громади витрачали в середньому 7% своїх бюджетів на оплату енергоносіїв. Тому впровадження енергоефективних заходів в школах, лікарнях, адміністративних будівлях може допомогти заощадити кошти платників податків та використати їх на щось корисніше. Крім того, саме бюджетні заклади можуть стати позитивним прикладом для інших громадян [2].

Фінансувати такі заходи можна різними шляхами – в першу чергу власним коштом органів влади. Найпопулярніше джерело фінансування – у 2020 році таким чином покривали 79% витрат на енергоефективні заходи. А от державних програм підтримки для бюджетних закладів немає. Натомість існує чимало міжнародних проєктів, які надають не лише кошти, а й технічну підтримку та консультації.

В Україні муніципалітети мають право самостійно ініціювати програми з енергоефективності та укладати кредитні договори напряму з міжнародними фінансовими установами.

Проєкти та програми, хоч і приносять користь окремим спільнотам і громадам, все ж мають підкріплюватися ще й довгостроковим та системним баченням розвитку енергоефективності у масштабі всієї країни. Згідно із Законом України «Про енергетичну ефективність», Мінрегіон розробив Стратегію термомодернізації будівель до 2050 року. Вона визначає, наскільки країна хоче модернізувати будівлі та як вона це робитиме. А у найближчі роки до неї мають розробити ще й окремий план дій.

В рамках Європейського зеленого курсу (ЄЗК) ЄС ставить ціль досягти повної декарбонізації (тобто зменшення викидів парникових газів до об'ємів, які повністю поглинаються з атмосфери екосистемами або іншими методами) сектору будівель до 2050 року. Україна, як потенційна членкиня, має формувати свої цілі відповідно до європейських.

Для підвищення енергоефективності ще 2010 року в ЄС погодилися активно впроваджувати практику будівництва Near-Zero Energy buildings (NZEB, будинків із майже нульовим споживанням енергії). Ці споруди мають відповідати найвищим стандартам енергоефективності – від ефективного освітлення і домашніх пристроїв до розумних термостатів і щільних вікон, тобто потребувати мінімуму енергії. Крім того, більша частина цієї енергії має вироблятися з відновлюваних джерел, найкраще – з установлених на самих будівлях чи поблизу.

Також країни ЄС повинні розробляти довгострокові плани того, як збільшуватимуть частку NZEB на своїй території, та презентувати їх Єврокомісії. 2021-го в ЄС вирішили переглянути директиву та розвинути концепцію NZEB до Zero Emissions Buildings (ZEB, будинків із нульовими викидами). Такі будинки так само мають потребувати мінімуму енергії, але вже вся вона мусить вироблятися з ВДЕ. Тобто ZEB повинні забезпечувати свої потреби в енергії, не спричиняючи викидів парникових газів. Ці будівлі можуть стати обов'язковими з початку 2027 року для громадського і з 2030-го для абсолютно всього нового будівництва в ЄС.

У проєкті Національного плану відновлення України, який розробляв український уряд спільно із сотнями експертів, вже закладено модернізацію житла. Там є проєкти і з енергоефективної відбудови житла, і з упровадження теплових насосів, і навіть пілотне будівництво NZEB. Однак Нацплан розглядає питання ефективності будівництва у двох п'ятирічних часових рамках, в яких планується впровадити відповідні рішення: 2020–2025 роки – розробка законодавчої бази, 2027-й – перехід на обов'язкову відповідність стандартам NZEB. І на сьогодні основна проблема полягає в тому, що для будівель NZEB відсутні технічні норми та вимоги [3].

Енергетична забезпеченість України є однією з найнижчих у світі, оскільки країна майже не має ендегенних ресурсів викопного палива та регулярно піддається обстрілам та військовим діям з боку росії. Як країна, що отримала у 2022 році статус кандидата на вступ до Європейського Союзу, вона має прийняти основне законодавство Євросоюзу та розвивати свої енергетичні ринки для подальшої інтеграції на регіональному та європейському рівні. До того ж Україна враховує у низці офіційних документів прагнення забезпечення стійкості енергетичного сектора та мінімізації наслідків зміни клімату.

Список літератури:

1. Національна економічна стратегія 2030 [Електронний ресурс]// Кабінет Міністрів України. – Режим доступу: <https://nes2030.org.ua>. – Назва з екрану.
2. Енергетичний фактор війни України з Росією [Електронний ресурс] // Gazeta.ua. – Режим доступу: https://gazeta.ua/articles/life/_energetichnij-faktor-vijni-ukrayini-zrosiyeu/610174. – Назва з екрану.
3. Про енергоефективність під час війни [Електронний ресурс]// Проєкт «Єдиний рахунок». – Режим доступу: <https://pay.vn.ua/articles/1300>. – Назва з екрану.

УДК 628.52: 504.06

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ СКОРОЧЕННЯ NO_x У ПРОЦЕСАХ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

Гуцол О.О., Олійник Д.А.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ

vitusinskasasa@gmail.com; ol.dima2111@gmail.com

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Шелешей Т.В.

Інтенсивний розвиток енергетики, промисловості та транспорту неминуче викликає зростання споживання вуглеводневого палива, що в свою чергу, збільшує кількість продуктів його згоряння, здебільшого оксиди азоту (NO_x). Вони ж з сірчистими ангідридами (SO_2) становлять найпоширеніші токсичні сполуки, які, потрапляючи в атмосферу, розчиняються в її волозі і утворюють при цьому слабкі розчини сірчаної (H_2SO_4) та азотної кислот (HNO_3), що призводить до кислотних дощів. Також надлишковий вміст у повітрі оксиду азоту (NO_x) може ініціювати процес розкладання озону (O_3).

Огляд первинних заходів азотоочистки в теплоенергетиці є ключовим для зменшення викидів оксидів азоту (NO_x), які утворюються під час спалювання палива в котлах електростанцій. Ці заходи спрямовані запобіганню утворювати викиди азоту, це дозволяє не лише зменшити викиди, але й знизити загальний екологічний вплив.

Основні первинні заходи очистки: малотоксичні пальники, ступенева подача повітря, подача третинного повітря, рециркуляція димових газів й триступенева подача повітря та палива [7].

Малотоксичні пальники - це пристрої розроблені задля зниження викидів шкідливих речовин таких, як оксид азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO_2) та незгорілі вуглеводні. Вони широко використовуються в різних системах опалення, а також є дуже важливими елементами в підвищення ефективності [3].

Основною перевагою малотоксичних пальників є зменшення викидів шкідливих речовин та довготривалою роботою в автоматичному режимі, не потребуючи постійного додавання палива.

Головним недоліком залишається вимога до постачання якісного палива, а також потреба у частому очищенні.

Малотоксичні пальники зазвичай працюють з використанням комбінації технологій, призначених для мінімізації шкідливих викидів. Згідно з дослідженнями, комбіноване використання низькоемісійних пальників зі ступінчастою подачею повітря та рециркуляцією димових газів може призвести до скорочення викидів оксидів азоту (NO_x) до 50% [1].

Ступенева подача повітря – це контрольоване, поетапне введення повітря в систему розділення – як правило, адсорбцію під тиском або мембранне розділення, що використовується для вилучення високочистого азоту з

атмосферного повітря. Цей процес підвищує ефективність і дозволяє краще контролювати чистоту і продуктивність. Сутність цього методу полягає в тому, що в первинну зону горіння подають менше повітря, ніж потребується теоретично [4].

Основними перевагами є те, що повітря подається саме в ті зони, де йде активне згорання, знижуючи перевитрати та дозволяє точно регулювати температуру й швидкість горіння палива. Разом з малотоксичними пальниками, забезпечує швидке запалювання, стабільність та зменшення максимальної температури факелу.

Серед недоліків варто зазначити, що при застосуванні низькоякісного палива ефективність ступеневої подачі знижується.

Подача третинного повітря з паливом використовується для запуску та підтримки основного горіння. Вторинне повітря потрапляє в камеру згорання палива для посилення стабілізації полум'я, а третинне повітря, в свою чергу, потрапляючи у верхню зону для повного окиснення газів, зменшує викиди та допомагає рівномірно змішувати продукти згорання.

Головною перевагою є забезпечення повного згорання органічних газів, які утворюються в результаті піролізу або неповного згорання.

Найбільшим недоліком є некоректне управління, тому що недостатня подача або неправильне розташування можуть негативно вплинути на загальний процес горіння і призвести до різних проблем, таких як зниження ефективності, збільшення викидів і навіть ризик перепалювання.

Рециркуляція відпрацьованих газів є найбільш ефективний метод придушення утворення оксидів азоту (NO_x) при спалюванні як газу, так і мазуту, що дозволяє знизити вміст оксидів азоту (NO_x) у вихідних газах на 60-70%. Метод заснований на відборі частини продуктів згорання за котлом і подачі їх в зону горіння. Реалізація пропонованої технології рециркуляції відпрацьованих газів на котлі не вимагає підвищення продуктивності димососів, необхідно тільки виготовлення системи перепускних трубопроводів для продуктів згорання [5].

Ключовими перевагами рециркуляції відпрацьованих газів є те, що при невеликих витратах можна досягти значний екологічний ефект, крім цього, зменшується ймовірність перегріву екранних поверхонь топки, а також забезпечується вирівнювання полів температур в котельній камері, що, у результаті, дозволяє збільшити міжремонтні періоди.

Основними проблемами залишається збільшення викидів шкідливих речовин, засмічення системи та потенційно зниження потужності двигуна.

У триступеневій подачі повітря і палива на першому етапі основна частина палива спалюється в умовах дефіциту повітря. У цьому процесі значна частина азоту, зв'язаного з паливом, перетворюється на NO . На другому етапі залишкове паливо додається, що переводить умови спалювання в паливно-багаті, і NO перетворюється на азот N_2 . На третьому етапі завершується процес спалювання, тому CO та H_2 , утворені з палива, доданого на другому етапі, окислюються. Щоб уникнути утворення термічного оксиду азоту NO_x на

третьому етапі, температура знижена шляхом встановлення частини системи рекуперації тепла між другим та третім етапами [2].

Головна перевага заключається в ефективному зменшенні викидів оксидів азоту (NO_x) за відносно дешеві модифікації процесу згоряння палива.

Головними недосконалостями є те, що низькосортне паливо може спричинити дисбаланс між ступенями подачі, що в результаті утворить неузгоджену роботу ступенів подачі та призведе до нестабільності полум'я або пульсації [6].

Висновок. Найефективнішим методом первинних заходів скорочення викидів оксидів азоту серед вище описаних можна вважати триступеневу подачу повітря і палива. Цей метод проявляє найпродуктивніше спалювання азоту без значних економічних недоліків. Однак при використанні комбінованих методів є інноваційні малотоксичні пальники з рециркуляцією димових газів, оскільки вони можуть забезпечити скорочення викидів до 50%, що значно перевищує ефективність триступеневої подачі повітря і палива.

Список літератури:

1. Тесленко О.І. Дослідження та оптимізація технологічних об'єктів і систем енергетики / О.І. Тесленко // Проблеми загальної енергетики. – 2019. – 4(59). – С. 54-61.
2. Stapf D. Modeling of NO_x Reduction by Reburning / D. Stapf, K. Ehrhardt, W. Leuckel // Chemical Engineering & Technology. – 1998. – 21(5). – P. 412-415.
3. Baukal C.E., Jr. The John Zink Hamworthy Combustion Handbook / C.E. Baukal, Jr.; 2nd Edition. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 936 p.
4. Kuo K.K. Principles of Combustion / K.K. Kuo; 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2000. – 676 p.
5. Baukal C.E., Jr. Industrial Combustion Testing / C.E. Baukal, Jr. – New York: John Wiley & Sons, 2004. – 288 p.
6. Cornforth J.R. Combustion Engineering and Gas Utilisation / J.R. Cornforth. – Oxford: Pergamon Press, 1988. – 412 p.
7. Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They are Controlled [Electronic resource] / United States Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC: Office of Air Quality Planning and Standards, 1999. – 57 p. – Access mode: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fnoxdoc.pdf>. – Title from the screen.

УДК 628.52: 504.06

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗОЛЬНИХ ВИКИДІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ: КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ЗОЛООЧИСНИХ СИСТЕМ

Чмихало Б.О., Галіченко Д.В., ас. Беднарська І.С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

chmykhalo.bogdan@lil.kpi.ua, halichenko.daniil@lil.kpi.ua

Науковий керівник: к.т.н. ст. викл. Шелешей Т.В.

Сьогодні питання забруднення навколишнього середовища набуває дедалі більшої актуальності. Одним із найбільших джерел забруднення є викиди золи та шлаку, що утворюються під час спалювання твердого палива на теплових електростанціях та в котельнях. Ці тверді частинки містять токсичні речовини, які при потрапленні в атмосферу можуть негативно впливати на здоров'я людей, тварин та рослинний світ. В умовах зростання обсягів енергоспоживання проблема знешкодження золи й шлаку стає ще гострішою. Саме тому золоочисні установки мають ключове значення для зменшення шкідливого впливу на довкілля. Їхнє основне призначення – ефективне уловлювання твердих частинок перед викидом димових газів у атмосферу. Існує кілька типів таких установок: гравітаційні, інерційні, електростатичні, рукавні та інші. Кожна з них має свої конструктивні особливості та рівень ефективності. У цьому огляді розглянуто сучасні золоочисні технології, їх принцип дії та роль у зниженні екологічного навантаження.

Метою даного дослідження є визначення ефективності різних типів золоочисних установок у системах теплопостачання, їх впливу на зниження рівня забруднення атмосферного повітря та обґрунтування доцільності використання конкретних технологій очищення димових газів з урахуванням екологічних та техніко-економічних чинників.

Батарейний циклон (мультициклон) – це газоочисна установка відцентрової дії, що складається з кількох (від кількох до сотень) невеликих циклонів (діаметром 40–200 мм), об'єднаних у спільному корпусі з єдиними системами подачі газу, відведення очищеного потоку та збору пилу чи золи [5]. Використовується для очищення димових газів від золи, пилу або інших твердих частинок, зокрема в котельних установках, на теплоелектростанціях, у металургії, хімічній промисловості та при переробці зерна [1, 4]. Запилений газовий потік подається через вхідний патрубок у циклонні елементи, де за допомогою спеціальних закручувальних пристроїв (уліток або лопаток, нахилених на 25–30°) набуває спірально-обертального руху. Під дією відцентрової сили частинки золи чи пилу (розміром від 5 мкм) притискаються до внутрішніх стінок циклону, втрачають швидкість і осідають у бункер. Очищений газ змінює напрямок руху (протиток), піднімається вгору через вихлопні труби та виводиться через вихідний патрубок у атмосферу або в

наступну систему очищення. Зібрана зола/пил автоматично видаляється з бункера за допомогою шнекового транспортера або шлюзових затворів [5].

Електрофільтр (електростатичний осаджувач) – це золоочисна установка, яка використовується для уловлювання твердих частинок (золи, пилу) і аерозолів із димових газів шляхом їх осадження в електричному полі [5]. Застосовується на теплових електростанціях, у металургії, цементній, хімічній промисловості та інших галузях для очищення газів від забруднень, забезпечуючи відповідність екологічним нормам [4, 7]. Димові гази проходять через електрофільтр, де потрапляють у зону з високовольтним електричним полем (30–80 кВ). У зоні корони (біля негативно заряджених електродів) частинки золи чи пилу заряджаються негативно через іонізацію газу. Заряджені частинки під дією електричного поля рухаються до позитивно заряджених осаджувальних електродів (пластин або труб). Частинки осідають на поверхні електродів, утворюючи шар золи/пилу. Осаджені частинки періодично видаляються з електродів за допомогою вібраційних або ударних систем (сухі електрофільтри) або промиванням водою (мокрі електрофільтри). Зібрана зола транспортується в бункер для подальшої утилізації чи використання (наприклад, у будівництві) [5].

Рукавні фільтри застосовуються для сухого очищення повітря або димових газів від твердих зважених частинок. Принцип їх дії базується на фільтрації газового потоку через спеціальні фільтрувальні елементи – рукави, виготовлені з тканинних або синтетичних матеріалів. Пил осідає на зовнішній або внутрішній поверхні фільтрувального матеріалу, залежно від конструкції, утворюючи пиловий шар, який додатково підвищує ефективність фільтрації. Очищений газ виводиться з корпусу фільтра, тоді як пил, накопичений на рукавах, періодично видаляється за допомогою однієї з систем регенерації: механічної вібрації, зворотної продувки стисненим повітрям або імпульсною пневмокамери. Ефективність очищення в рукавних фільтрах становить понад 99 %, що забезпечує їх широке застосування в галузях промисловості та теплоенергетики, де висуваються жорсткі вимоги до викидів пилу в атмосферу [3].

Скрубери працюють за принципом мокрого очищення: забруднені гази проходять через зрошувальну рідину (зазвичай воду або спеціальні розчини), яка вловлює тверді та газоподібні домішки. Цей процес може включати різні механізми, такі як інерційне зіткнення, дифузія, гравітаційне осадження та хімічна абсорбція. Скрубери Вентурі забезпечують високоефективне очищення дрібнодисперсного пилу (1–2 мкм) завдяки високій швидкості газового потоку та інтенсивному контакту з рідиною. Барботажні та пінні скрубери працюють за наступним принципом: газ проходить через шар рідини або піну, що забезпечує ефективне вловлювання домішок. Насадкові скрубери використовують спеціальні насадки для збільшення площі контакту між газом і рідиною, що підвищує ефективність очищення. Відцентрові скрубери застосовують відцентрову силу для вловлювання частинок пилу, що дозволяє ефективно очищати газові потоки [5].

У табл. 1 наведено порівняльну характеристику основних типів золоочисних установок з урахуванням принципу їхньої дії, ефективності очищення, конструктивних переваг, обмежень та галузей застосування [5, 7].

Таблиця 1

Основні типи золоочисних установок

Тип золоочисної установки	Принцип дії	Ефективність уловлювання, %	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
Циклон	Відцентрове осадження частинок	70–85	Надійність, простота, без потреби у фільтрах	Низька ефективність для дрібнодисперсного пилу	Промислові та енергетичні котли
Електрофільтр	Електростатичне осадження частинок	95–99	Висока ефективність, тривалий термін служби	Висока вартість, потребує стабільного електроживлення	ТЕС, великі котельні
Рукавний фільтр	Механічна фільтрація через тканинні мішки	99 і вище	Дуже висока ефективність, універсальність	Висока вартість обслуговування, знос тканини	Підприємства з високими вимогами до очищення
Вологий скруббер	Зв'язування частинок рідиною	85–95	Одночасне видалення пилу і газоподібних домішок	Необхідність утилізації шламу, корозія обладнання	Хімічна промисловість, ТЕС з комплексним очищенням

Висновок. У процесі спалювання твердого палива на теплоенергетичних установках утворюється значна кількість золи та шлаку, що є одними з основних джерел забруднення атмосферного повітря. Проведений огляд золоочисних установок показав, що існує широкий спектр технологій для уловлювання твердих частинок: від простих гравітаційних камер до високоефективних електрофільтрів та рукавних фільтрів. Кожен тип обладнання має свої конструктивні особливості, рівень ефективності, експлуатаційні переваги та недоліки. Найвищий ступінь очищення забезпечують рукавні фільтри та електрофільтри, однак вони вимагають значних інвестицій і ретельного технічного обслуговування. Циклонні системи можуть бути ефективними на підприємствах з невисокими вимогами до очищення або як перший ступінь фільтрації. Рациональний вибір золоочисного обладнання повинен базуватись на аналізі техніко-економічних характеристик, обсягу пилових викидів і екологічних нормативів. Таким чином, впровадження

сучасних систем золоочищення є невід'ємною частиною екологізації теплоенергетики та зменшення антропогенного навантаження на довкілля.

Список літератури:

1. Білецький В.С. Технологія збагачення корисних копалин: посібник / В.С. Білецький, В.О. Смирнов. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2004. – 272 с.
2. Смирнов В.О. Переробка корисних копалин / В.О. Смирнов, В.С. Білецький, Р.О. Шолда. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 600 с.
3. АВ Technologies. Рукавні фільтри. Призначення і принцип дії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://abtechnologies.com.ua/korysni-instrumenty/rukavni-filtri-priznachennya-i-printsip-diyi/> (дата звернення: 06.05.2025). – Назва з екрана.
4. Мовчан В.П. Основи металургії / В.П. Мовчан, М.М. Бережний. – Дніпропетровськ: Пороги, 2001. – 336 с.
5. Брусиловський І.В. Технології очищення газів у промислових системах / І.В. Брусиловський. – Київ: Техніка, 2005. – 320 с.
6. Котельников В.П. Промислова екологія та очищення викидів / В.П. Котельников, Ю.О. Лебедев. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – 280 с.
7. Петров О.М. Сучасні методи уловлювання золи на теплових електростанціях / О.М. Петров, В.І. Сидоренко // Енергетика та екологія. – 2018. – № 3(45). – С. 12-20.

Алфавітний покажчик авторів*

Beshynskyi M.I.	155	Жук Д.В.	191
Chepurko A.O.	155	Жуков О.В.	47
Feshchenko D.O.	155	Жуков Р.О.	105
Maslova T.B.	131(к), 155(к)	Зайцев О.О.	142
Venedyktova D.V.	131	Запорожець А.О.	85(к)
Андропова О.В.	121, 128, 135, 142	Зініч І.О.	93
Апостол Я.А.	157	Ібрагім А.М.	188
Бабиш А.І.	193	Іванов О.С.	121
Баженов В.А.	10	Івкіна Е.С.	176
Башлаєв М.А.	47	Каракуца В.П.	49
Беднарська І.С.	59, 75, 157, 179, 183, 186, 193, 208	Качула І.В.	93
Богомол В.В.	89	Клевцов К.М.	188
Боднар Р.О.	14	Климюк А.С.	198
Бондар І.В.	22	Клімов Р.О.	46, 58, 61, 171
Булах І.І.	201	Клішня С.С.	81
Булгару І.М.	66	Кобалава Г.О.	53(к)
Вареник К.С.	25	Коваленко О.Ю.	28
Васильєв М.І.	114	Коваль В.В.	28
Величко Д.А.	62	Колесник К.А.	81
Величко О.А.	62	Комар В.П.	53
Венгер О.О.	176	Комаров С.Ю.	109
Верташ Д.С.	138	Коновалов Р.А.	99
Воїнов О.П.	93	Коренков О.О.	168
Войтенко Ю.В.	138	Коренкова М.О.	168
Волчок В.О.	66	Коровін О.О.	58
В'юнник С.Є.	34	Короташ А.І.	201
Гавриленко Я.В.	148	Кострубов Д.В.	99
Гайко О.М.	32	Кошельнік О.В.	47
Галіченко Д.В.	208	Кривенчук А.В.	118
Глушко А.В.	114	Крюковська О.А.	58
Горський В.В.	78	Кузнецов С.І.	176
Грисевич Р.І.	109	Куляпін Д.В.	198
Густяков С.О.	66	Кунденко М.П.	62(к), 99(к)
Гуцол О.О.	205	Курак В.В.	25, 32, 96, 109
Данилюк В.В.	135	Курманенко А.Р.	22
Денисенко Д.О.	89	Лазур В.І.	43
Дерій В.О.	148(к)	Лазур О.В.	43
Дзюбан Ю.І.	78	Лещенко П.М.	85
Долгополов І.С.	49	Леденьов М.І.	186
Дон Н.Л.	18, 89, 114	Лісова В.В.	96
		Лі-фан-се Б.В.	186

Любезний А.В.	18	Філічкін Д.К.	171
Матусевич Х.Б.	183	Фурса М.В.	14
Назаренко І.А.	105	Халдобін П.В.	172
Нерубацький В.П.	125, 152, 165	Хоменко В.І.	22
Новосельцев О.В.	161(к)	Цветков А.О	118
Огурцов С.С.	125, 165	Циган П.С.	38(к)
Олименко І.О.	157	Чайка Д.А.	38
Олізаренко В.О.	73	Чмихало Б.О.	208
Олійник Д.А.	205	Чорна Н.А.	145
Оліферук Т.С.	59	Чупріна Л.О.	70
Онищук М.В.	198	Шаповалова Д.С.	152
Онїпченко Р.С.	101	Шевченко Г.О.	172
Островський А.В.	179	Шелешей Т.В.	55, 59(к), 75(к), 157(к), 179(к), 183(к), 186(к), 193(к), 198(к), 205(к), 208(к)
Пейкрішвілі М.Ш.	195	Якунін А. В.	34(к)
Петрик О.А.	105	Янковська О.М.	10
Пікалов Д.Д.	112	Яровий О.С.	53
Плотніков О.О.	18	Яценко С.С.	75
Погребняк І.Ф.	191, 195	Яценко Ф.О.	101
Прищепа Е.П.	193		
Пугачова Т.М.	64, 73		
Розен В.П.	161		
Розен П.В.	161		
Савонюк М.В.	64		
Самохвалов В.С.	168(к), 172(к)		
Самохвалова А.О.	172		
Смєшко А.А.	32, 121		
Смирнов А.С.	46		
Смоковський М.В.	145		
Соколовська І.Є.	43, 112, 118		
Солодовник Ю.Ю.	70		
Соляник М.Ю.	53		
Сотник Є.А.	112		
Степанчиков Д.М.	14, 28, 81, 101		
Тарасенко М.О.	70		
Тарасенко О.М.	70		
Тендітний Д.О.	96		
Тесленко М.О.	179		
Телєгін О.В.	168		
Трубник А.О.	61		
Турчин В.Ю.	128		
Усов І.Л.	55		
Фалєєв Ф.Р.	125, 165		

* (к) – тільки керівник роботи

Наукове електронне видання

МАТЕРІАЛИ

Дев'ятої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів,
аспірантів і молодих вчених

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

22 травня 2025 р.

м. Хмельницький, Херсонський національний технічний університет
http://kntu.net.ua/Conference_ARME

ISBN 978-617-8187-48-4 (електронне видання)

ISBN 978-617-8187-48-4



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 20.05.2025 р. Формат 60×84/8.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 24,39. Обл.-вид. арк. 27,40.
Замовлення № 3131.

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