

ІНТЕГРАЦІЯ ПОБУТОВИХ ВОДОНАГРІВАЧІВ У СИСТЕМИ РЕАГУВАННЯ НА ПОПИТ В ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

В.М. Кіянчук*, К.В. Махотіло**,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

E-mail: Vladyslav.Kiianchuk@ieec.khpi.edu.ua.

У роботі представлено комплексне дослідження побутових електричних накопичувальних водонагрівачів (ЕНВ) як гнучкого ресурсу для реагування на попит в енергетичній системі. Проведено аналіз українського ринку побутових водонагрівачів, оцінено їхню поширеність та технічний потенціал для участі у програмах реагування на попит. Спроектовано та реалізовано дослідну установку ЕНВ, яка дає змогу збирати високоточні дані про теплові процеси в баку та споживання електричної енергії, які стали основою для верифікації моделі. Реалізовано та верифіковано комп'ютерну математичну модель теплової та електричної динаміки ЕНВ, побудовану на основі фізичних і поведінкових звичок споживачів. За допомогою цієї моделі побудовано криві оптимальності Парето, які дали можливість визначити компроміс між рівнем комфорту та гнучкістю споживання ЕНВ. Встановлено температурні межі прийняттого комфорту споживача, а також реакцію ЕНВ на сигнали керування від агрегатора. Запропоновано дворівневу архітектуру інтеграції ЕНВ у системи керування попитом з використанням відкритого протоколу OpenADR, що дає змогу агрегатору ефективно взаємодіяти з операторами систем розподілу та передачі, а також кінцевими споживачами. Задля підтвердження результатів виконано експериментальне моделювання поведінки агрегованої групи споживачів у відповідь на сигнали активації. Визначено ключові етапи створення ринкових продуктів реагування на попит: формування ресурсної бази, створення агрегованих продуктів та їхня реалізація на ринку електричної енергії. Проаналізовано бар'єри, які стримують впровадження програм реагування на попит, зокрема низьку інформованість споживачів, відсутність економічних стимулів та обмеженість технологічної готовності. Бібл. 11, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: реагування на попит, водонагрівач, агрегатор, енергоефективність, розумна мережа, енергомоніторинг, ринок електричної енергії.

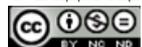
Вступ. Сучасні енергетичні системи переживають структурну трансформацію через зростання частки відновлюваних джерел енергії та децентралізації об'єктів генерації. Це вимагає розробки та впровадження нових підходів до балансування. Одним із найбільш перспективних інструментів стає реагування на попит, під час якого споживачі адаптують своє споживання залежно від стану енергетичної системи та цін на ринку електричної енергії. Домогосподарства, як найчисельніша категорія споживачів електричної енергії, мають значний потенціал для зменшення споживання. В свою чергу, серед побутових приладів ЕНВ є найпоширенішими та технічно найпридатнішими для реагування на попит. За допомогою агрегаторів можливе об'єднання тисяч або мільйонів ЕНВ з метою створення гнучкого ресурсу для реалізації на ринку електричної енергії. Все це створює передумови для масової інтеграції ЕНВ в динамічні системи керування навантаженням, що надасть додаткові ресурси для балансування енергетичної системи. Попередні наші дослідження окремих аспектів реагування на попит за допомогою ЕНВ [1–4] показали можливість успішного розв'язання цієї задачі, що обумовлює необхідність їхнього узагальнення та подальшого розвитку для моделювання і визначення ефективних торгових стратегій агрегатора на ринку електричної енергії. Таким чином, дана робота поєднує технічні, організаційні та поведінкові аспекти, формуючи цілісну основу для розвитку програм реагування на попит із використанням побутових ЕНВ.

Метою роботи є поєднання результатів експериментальних та теоретичних досліджень моделей побутових ЕНВ та обґрунтування підходів до агрегування груп ЕНВ у програми реагування на попит та реалізації продуктів на ринку електричної енергії з урахуванням впливу на комфорт споживачів.

© Кіянчук В.М., Махотіло К.В., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-7765-3910>; ** <https://orcid.org/0000-0001-7081-071X>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Характеристика водонагрівачів як об'єкта ресурсу реагування на попит. За статистичними даними Державної служби статистики України [5] серед 14,678 млн. домогосподарств частка тих, хто має електричний водонагрівач, становить 38,9 %. Це дає змогу оцінити орієнтовну кількість експлуатованих пристроїв на рівні 5,71 млн. одиниць.

Згідно з аналітичними даними одного з провідних онлайн-порталів роздрібною торгівлю технікою – Hotline.ua – станом на початок 2024 року можна припустити, що частка накопичувальних водонагрівачів на українському ринку становила 83,6 %, у той час як проточні моделі займали лише 16,3 %. Типові об'єми баків становлять від 10 до 200 л, а номінальна потужність трубчастих електронагрівачів (ТЕН) у межах від 1 до 5 кВт.

Серед накопичувальних ЕНВ переважає вертикальний монтаж – 81,7 % проти 18,2 % моделей горизонтального монтажу. Щодо типів ТЕН, більшість представлених на ринку ЕНВ (61,2 %) мають так звані «мокрі» ТЕН, натомість ЕНВ з «сухими» ТЕН складають 38,7 %.

Вибір водонагрівача є індивідуальним і відбувається з врахуванням конкретних потреб та умов кожної сім'ї. Можна припустити, що типовим варіантом в Україні є ЕНВ об'ємом від 50 до 100 л та потужністю від 1,6 до 2 кВт.

Розподіл частки пропозиції на ринку України різних моделей ЕНВ за об'ємом та потужністю наведено на рис. 1.

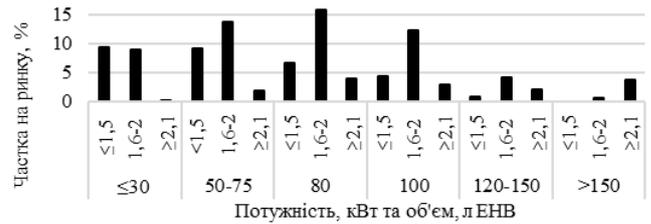


Рис. 1

З наведених даних випливає, що в Україні сформована значна база ЕНВ із потенціалом для використання як гнучкого енергоресурсу балансування енергетичної системи. Але необхідною передумовою для ефективного залучення цих ЕНВ в програми реагування на попит є врахування їхніх технічних характеристик та типових режимів експлуатації.

Дослідна установка ЕНВ. Однією з ключових проблем під час моделювання та управління ЕНВ є обмежена доступність верифікованих експериментальних даних, що показують їхню реальну роботу в умовах побутового використання. Зокрема, складність полягає в точному відображенні взаємозв'язку між фактичним розбором гарячої води, електричним навантаженням і температурним комфортом споживача. Оскільки ефективне управління ЕНВ потребує точної інформації про їхню динаміку в умовах реального споживання, важливим є впровадження концепції інтелектуального моніторингу, що базується на поєднанні автоматизованого збору, системного аналізу відповідно до сучасних підходів цифровізації енергосистем [6]. Для збору даних, перевірки математичних моделей і оцінки потенціалу прямого реагування на попит було спроектовано та реалізовано дослідну установку ЕНВ, схему якої показано на рис. 2.

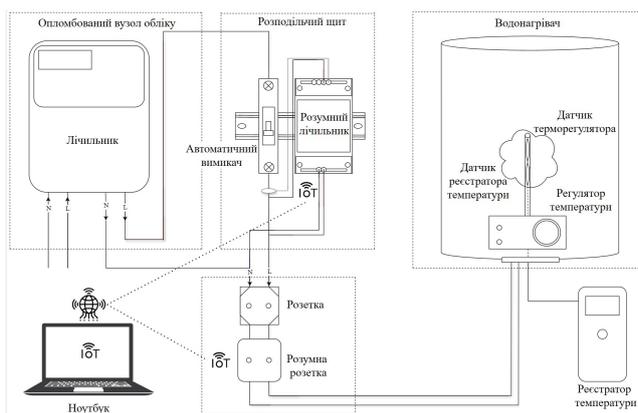


Рис. 2

Особливістю цієї дослідної установки є використання масово доступних компонентів із сегмента «розумного» дому, що дає змогу забезпечити дистанційне управління та моніторинг без потреби у спеціалізованих пристроях. Дослідження проводилося на типовому побутовому ЕНВ потужністю 1,2 кВт і об'ємом 80 л і охопило понад два роки деталізованих історичних даних. Обладнання дослідної установки включає в себе: «розумний» лічильник, «розумну» розетку, автоматичний реєстратор температури та контактний вимірювач температури.

Математична модель ЕНВ. Побудова комп'ютерної моделі ЕНВ вимагає врахування широкого кола вхідних параметрів, які охоплюють фізичні, геометричні та технічні характеристики як самого ЕНВ, так і навколишнього середовища. До таких параметрів належать щільність та питома теплоємність води, коефіцієнт термічної дифузії, геометричні розміри бака, потужність ТЕН, коефіцієнт тепловтрат бака. Серед параметрів середовища необхідно враховувати температуру повітря навколо ЕНВ та температуру вхідної холодної води. Крім того, ключову роль відіграють початкові умови та режими використання,

зокрема початковий температурний розподіл у баку, задана температура нагріву, витрата гарячої води в часі та тип терморегулятора.

В роботі [2] описано гібридну модель, що поєднує високу точність із помірними обчислювальними затратами. Основна ідея цієї моделі полягає в розділенні динаміки роботи ЕНВ на окремі типові фази, кожна з яких характеризується домінуванням одного фізичного процесу. У межах цієї концепції виділяють три характерні фази: спокій, нагрівання та злив (з або без одночасного нагрівання), які описуються наступними диференціальними рівняннями з частинними похідними.

Фаза I – спокій. Водонагрівач не працює, вода не зливається. Зміна температури відбувається лише через теплові втрати та дифузію. Динаміка описується одномірним рівнянням теплопровідності з граничними умовами

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - k(T - T_a); \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) = 0; \frac{\partial T}{\partial x}(h, t) = 0; T(x, 0) = T_0(x), \quad (1)$$

де $T_0(x)$ – початковий температурний профіль; $T(x, t)$ – температура води у шарі на рівні x у момент часу t ; x – відстань від дна бака до рівня шара води.

Фаза II – нагрівання. Вода нагрівається без зливу. Виникає зона «плато температури» від дна до висоти $x_p(t)$, де температура однорідна і дорівнює

$$T_p(t) = T_0(x_p(t)). \quad (2)$$

Енергетичний баланс плато описується рівнянням

$$T_p(t)x_p(t) = \int_0^{x_p(t)} T_0(x)dx + \int_0^t \frac{P(\tau)}{S\rho c_p} d\tau. \quad (3)$$

Динаміка межі плато описується

$$\frac{\partial T_0(x_p)}{\partial x} \frac{\partial x_p}{\partial t} = \frac{P}{S\rho c_p x_p}; x_p(0) = 0. \quad (4)$$

Фаза III – злив. Відбувається одночасний злив гарячої та нагрів холодної води. У баку формується зона змішування висотою $x_b(t)$ з однорідною температурою $T_b(t)$

$$T_b(t) = T(x_b(t), t). \quad (5)$$

Температура вище зони змішування описується задачею Стефана

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_d \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_t \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - k(T - T_a); \frac{\partial T}{\partial x}(h, t) = 0; T_b(0) = T_b^0; x_b(0) = x_b^0; T(x, 0) = T_0(x), \quad (6)$$

де $\alpha_t = 13$ – ефективний коефіцієнт теплової та турбулентної дифузії; v_d – швидкість зміни висоти водяного стовпа, визначена через об'ємний розбір води.

Задля розв'язання (1)–(6) у програмному середовищі OpenModelica [7] розроблено комп'ютерну модель ЕНВ, яка дає змогу точно відтворювати його теплову динаміку, режими нагріву та споживання електричної енергії. Реалізація на основі відкритого програмного продукту забезпечує її доступність, масштабованість і можливість інтеграції в системи управління енергоспоживанням.

Дані, отримані з дослідної установки, дали можливість визначити типові профілі реального електричного споживання ЕНВ, виявити характерні часові патерни та оцінити динаміку ЕНВ у різних режимах роботи. На їх основі виконано ідентифікацію параметрів та подальшу верифікацію математичної моделі (1)–(6). На рис. 3 наведено приклад моделювання роботи ЕНВ об'ємом 80 л та потужністю 1,2 кВт протягом 24 годин, який показує споживання потужності (P) та зміни температури в баку біля зони чутливості датчика терморегулятора (T_{sens}). Результати чисельних експериментів з моделлю демонструють її достатньо високу точність під час моделювання роботи ЕНВ протягом доби, а також здатність моделювати безперервні проміжки часу до 45 днів без втрати стійкості та значного погіршення точності.

На рис. 4 наведено приклад типового графіку відбору води у перехідний період року та одну з його випадкових реалізацій, яку використано для розрахунків на рис. 3. Такі графіки необхідні для подальшого дослідження та моделювання різних режимів роботи ЕНВ. Зокрема, вони дають змогу

сформувати реалістичні сценарії використання задля моделювання участі ЕНВ у програмах реагування на попит окремо або у складі агрегованих груп споживачів.

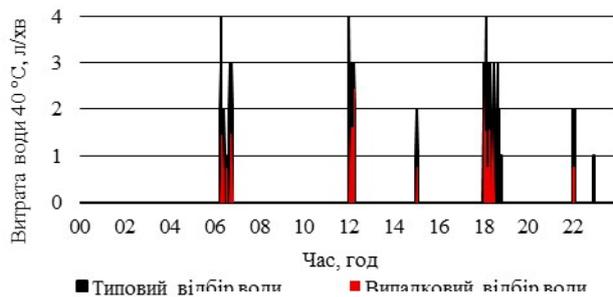


Рис. 4

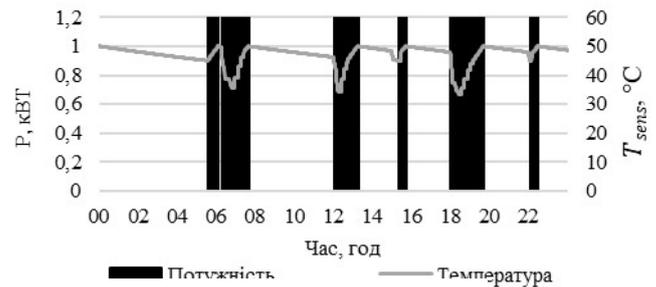


Рис. 3

Оцінка потенціалу ЕНВ для реагування на попит. Наступним етапом дослідження є формування підходів до оцінки рівня комфорту споживачів та енергоефективності ЕНВ із баками різного об'єму. Пропонується використовувати запас гарячої води (ЗГВ) як інтегральний показник ресурсу ЕНВ, що визначається як еквівалентний об'єм води температурою 40 °C, доступний із бака з урахуванням температурного розподілу по його висоті. Ця температура прийнята як комфортна для більшості побутових потреб, тоді як її зниження нижче зазначеної межі призводить до теплового дискомфорту та негативного сприйняття будь-яких обмежень роботи ЕНВ. Додатково пропонується використовувати показник надлишкової гарячої води (НГВ), що характеризує обсяг гарячої води з температурою не нижче 40 °C, який залишається після найбільшого добового піку водоспоживання. Таким чином НГВ є ключовим параметром задля планування режимів роботи ЕНВ, адже відображає фактичний рівень комфорту споживача.

Щоб дослідити та визначити межі компромісу між комфортом споживача та потенціалом ЕНВ, до участі в програмах реагування на попит здійснено математичне моделювання режимів роботи ЕНВ з різним об'ємом і налаштуванням температури нагріву. Припускається, що усі ЕНВ мали ідентичну потужність (2 кВт), однакові теплоізоляційні характеристики та були змодельованими в опалюваному приміщенні з температурою навколишнього середовища +23°C. Вважається, що місце встановлення ЕНВ знаходиться безпосередньо біля точок водорозбору, що дає змогу знехтувати тепловими втратами в трубопроводах.

Для цього моделювання ЕНВ використано типовий графік споживання гарячої води наведений на рис. 3, отриманий у результаті натурного експерименту в перехідний сезон (зовнішня температура +20...25°C, температура вхідної води – близько 15°C). Цей графік було застосовано до 11 умовних моделей ЕНВ, які відрізнялися об'ємом бака – від 50 до 100 л із кроком 5 л.

На рис. 5 наведено отриману оцінку НГВ у момент максимального розбору для кожної з зон I–IV: зона I – стан дискомфорту, коли наявної гарячої води у баку недостатньо для покриття пікового навантаження; зона II – мінімально допустимий комфорт із НГВ 0 л; зона III – підвищений рівень комфорту за наявності НГВ 20 л; зона IV – режим, що імітує команду агрегатора на годинне відключення з подальшим вичерпанням НГВ до 0 л.

Фактично, криві на рис. 5 є кривими оптимальності Парето, які показують зв'язок між значеннями об'єму баку та налаштуванням температури, здатними забезпечити той самий рівень комфорту. Зменшення об'єму або температури нижче критичного порогу, визначеного нижньою зоною межі, призводить до ймовірного теплового дискомфорту. Такий підхід дає можливість наочно представити як зміна параметрів впливає на кількість доступного НГВ та ризик виникнення дискомфорту.

Отримані результати також дають змогу здійснити кількісну оцінку ресурсного потенціалу ЕНВ в Україні як гнучкого ресурсу задля реалізації механізмів реагування на попит [3]. Задля оцінки враховувалися лише ЕНВ об'ємом 80–100 л, що є найбільш поширеними

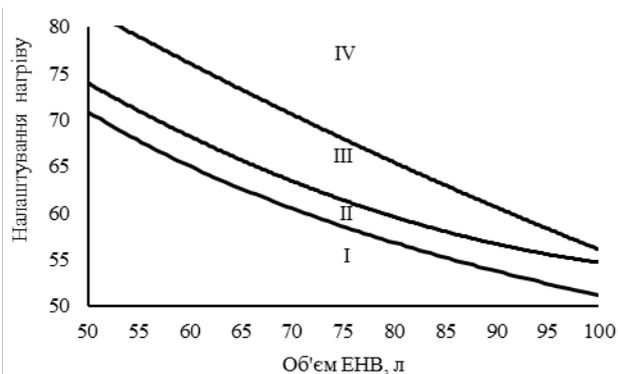


Рис. 5

на вітчизняному ринку водонагрівачів та мають достатні об'єм і потужність для ефективного залучення до програм реагування на попит. Розрахунки базуються на поєднанні ринкових часток, середніх технічних характеристик та коефіцієнтів структури споживання.

Загальний технічний ресурс таких пристроїв оцінено на рівні близько 3 ГВт, що вказує на суттєвий потенціал їхнього використання для гнучкого управління енергоспоживанням. Завдяки можливості агрегування великої кількості ЕНВ в єдину систему, вони можуть стати важливим інструментом для підтримки балансу в енергетичній системі, зменшення потреби в резервних генеруючих потужностях і підвищення ефективності роботи енергосистеми загалом.

Організаційні аспекти інтеграції ЕНВ у програми реагування на попит. Автоматизовані системи керування навантаженням є критичним компонентом програм реагування на попит, забезпечуючи ефективність їх реалізації завдяки високоточному енергомоніторингу [8]. Вони дають змогу агрегаторам у реальному часі відслідковувати споживання електричної енергії, дистанційно керувати приладами та адаптувати їхню роботу до поточного навантаження в енергосистемі. ЕНВ можуть бути інтегровані в такі системи через IoT-технології. Запропоноване рішення представлено у вигляді функціональної структури, що враховує інтеграцію з ринковими механізмами та забезпечує ефективну взаємодію між усіма сторонами процесу агрегації.

Один із найпоширеніших протоколів автоматизованого реагування – OpenADR [9], міжнародний стандарт обміну даними між операторами системи передачі (ОСП), агрегаторами та споживачами. OpenADR використовує HTTP або XML задля передачі даних між системами споживачів та агрегаторів. Обмін інформацією базується на двох ключових компонентах: (1) запит на активацію – сигнал від агрегатора задля коригування споживання відповідно до команди ОСП; (2) відповідь споживача – зміна режиму роботи електроприладів, зокрема ЕНВ, відповідно до отриманого запиту.

На рис. 6 показано запропоноване інфраструктурне рішення, яке показує взаємодію агрегатора з системами ОСП, оператора системи розподілу (ОСР) і кінцевими споживачами.

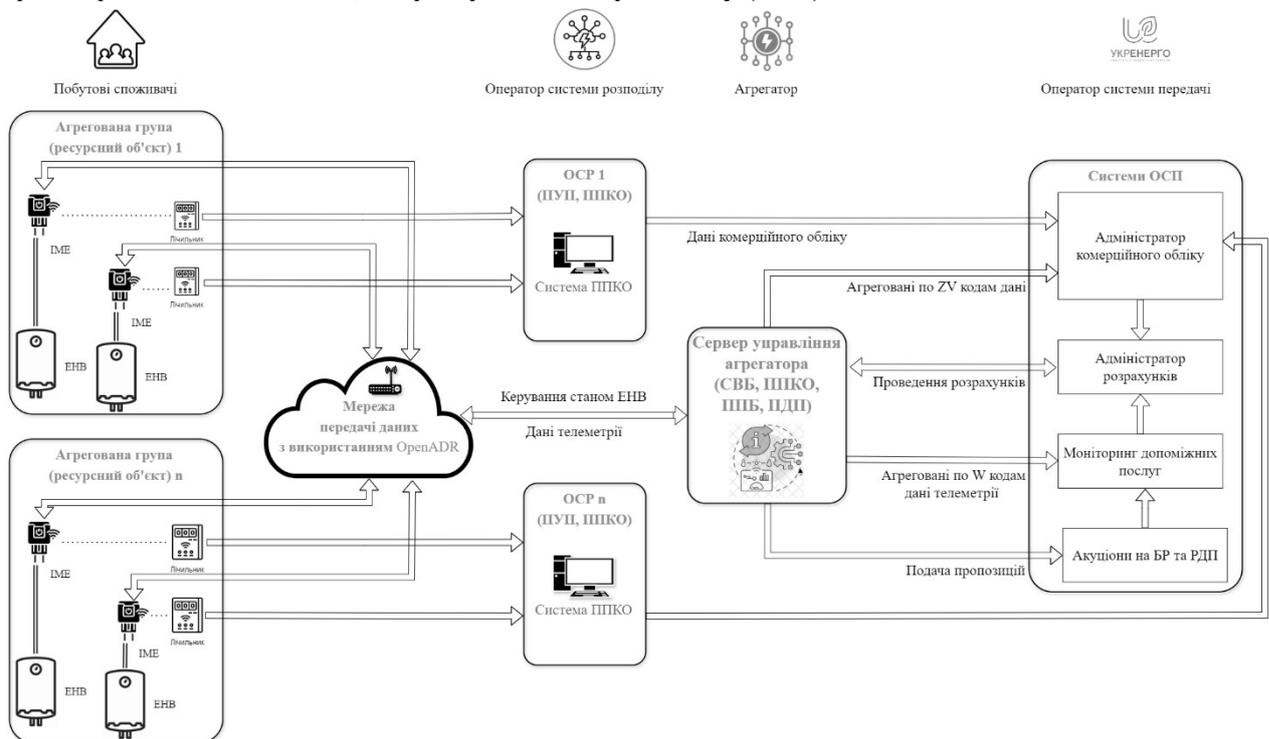


Рис. 6

Взаємодія між системою управління ринком та агрегатором здійснюється через мережу Інтернет із дотриманням технічних вимог ОСП щодо каналів зв'язку, інтерфейсів і комунікаційних протоколів. Центральним елементом цього процесу є формування агрегованих груп, що передбачає подання заявок, підключення відповідного обладнання, організацію обліку електроспоживання та реєстрацію в системі агрегатора. Формування груп відбувається за регіональним принципом із прив'язкою до постачальників універсальних послуг (ПУП) і постачальників послуг комерційного обліку (ППКО). Агреговані потужності реєструються як ресурсні об'єкти зі статусом одиниці надання

послуг, отримують енергетичний ідентифікаційний код (EIC) типу W і віртуальну точку обліку з кодом ZV . Агрегатор у межах взаємодії з ОСП виконує функції сторони, відповідальної за баланс (СВБ), а також постачальника послуг з балансування (ППБ) і постачальника допоміжних послуг (ПДП) під час подачі пропозицій на балансуєчий ринок (БР) та ринок допоміжних послуг (РДП).

Інфраструктура агрегатора має дворівневу структуру [4]. Верхній рівень – сервер управління – відповідає за обробку даних, ресурсне планування, взаємодію з ринком, застосовує інтеграційні платформи, технології Big Data, оптимізаційні алгоритми та машинне навчання. Нижній рівень – інтелектуальні модулі енергокерування (ІМЕ) у споживачів – забезпечують моніторинг і дистанційне керування ЕНВ чи іншими потужними електроприладами, підтримують зв'язок через Wi-Fi або мобільні мережі. Дані з ІМЕ зберігаються на сервері, використовуються задля аналізу, прогнозування та комерційного обліку.

Створення ринкових продуктів агрегації. Процеси агрегації споживачів умовно поділяються на три основні групи.

1. Формування ресурсів агрегації — охоплює створення агрегованих груп учасників, реєстрацію та облік їхніх даних, а також формування одиниць агрегації. Передбачає оснащення електроустановок відповідними пристроями керування споживанням.

2. Створення продуктів агрегації — включає реєстрацію одиниць агрегації як ресурсних об'єктів, отримання статусу надавача допоміжних послуг, збір та обробку телеметричних даних, прогнозування споживання та формування графіків і обсягів навантаження.

3. Виведення продуктів агрегації на ринок — охоплює подання планових ресурсних графіків, участь в аукціонах, управління навантаженням споживачів, а також приймання, підтвердження й виконання диспетчерських команд від ОСП. Також включає моніторинг і передавання даних комерційного обліку для операторів систем розподілу та передачі.

На рис. 7 наведено приклад агрегованого профілю споживання, сформованого шляхом об'єднання типових груп споживачів. Кожен профіль групи отримано шляхом усереднення індивідуальних добових профілів споживання ЕНВ, що відповідають типу домогосподарства.

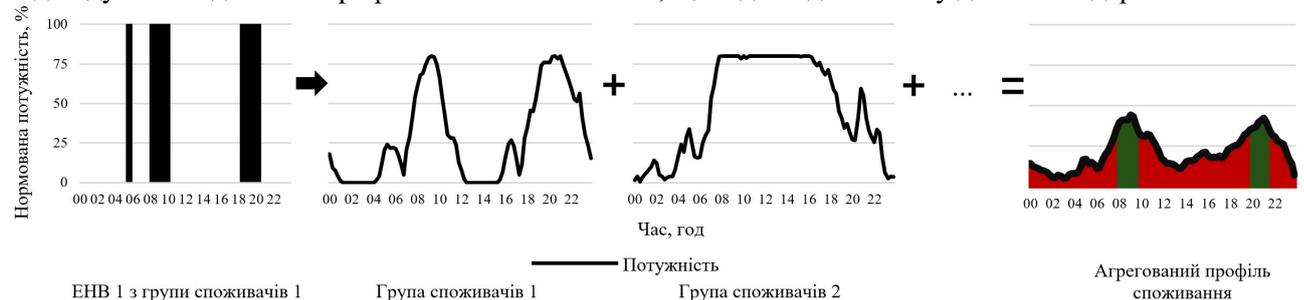


Рис. 7

Агрегований профіль споживання побудовано на основі 12 типових профілів домогосподарств, що охоплюють широкий спектр соціально-демографічних характеристик — від сімей із дітьми до пенсіонерів і однаків. За допомогою спеціальної поведінкової моделі [10] для кожної категорії згенеровано від 25 до 50 унікальних графіків водоспоживання, характерних для будніх днів осіннього періоду. Профілі відображають різні режими зайнятості (постійна, змінна, відсутня), що забезпечує моделі здатність враховувати реалістичні поведінкові патерни та формувати наближене до реального портфоліо навантаження.

Індивідуальні коливання графіків згладжуються на етапі агрегування, в результаті чого формується стабільний узагальнений профіль споживання. Це сприяє згладженню пікових навантажень, підвищенню коефіцієнта заповнення та підвищенню прогнозованості добового графіка електроспоживання агрегованої групи. На основі аналізу отриманих графіків виділено часові вікна з найвищим потенціалом для реалізації ресурсів гнучкості, позначені вертикальними смугами.

У моделі реалізовано сценарії активації ЕНВ, за яких робота включення ЕНВ обмежується відповідно до керуючих сигналів агрегатора. Усі ЕНВ в моделюванні мають об'єм 80 л і потужність 1,2 кВт. Температурні параметри роботи кожного ЕНВ контролюються вбудованим термостатом, який автоматично активує або деактивує ТЕН від поточної температури біля зони чутливості датчика терморегулятора та встановленої споживачем температури нагріву, яка складає 50 °С для всіх ЕНВ.

Задля аналізу реакції агрегованої групи споживачів змодельовано активацію двох типових продуктів балансуєчого ринку: БР_з_09 (відключення ЕНВ з 08:00 до 08:59) та БР_з_21 (відключення з

20:00 до 20:59). Агрегований профіль, отриманий шляхом об'єднання індивідуальних режимів роботи ЕНВ, виступає основою для оцінки виконання команд, впливу на комфорт споживачів, розробки оптимальних торгових стратегій, а також відскоку споживання після відміни команди.

На рис. 8 наведено графіки споживання потужності агрегованої групи з 425 ЕНВ потужністю 1,2 кВт за двома сценаріями: базовим та за умови активації за командою агрегатора. В таблиці наведено параметри активації агрегованої групи ЕНВ відповідно до рис. 7.

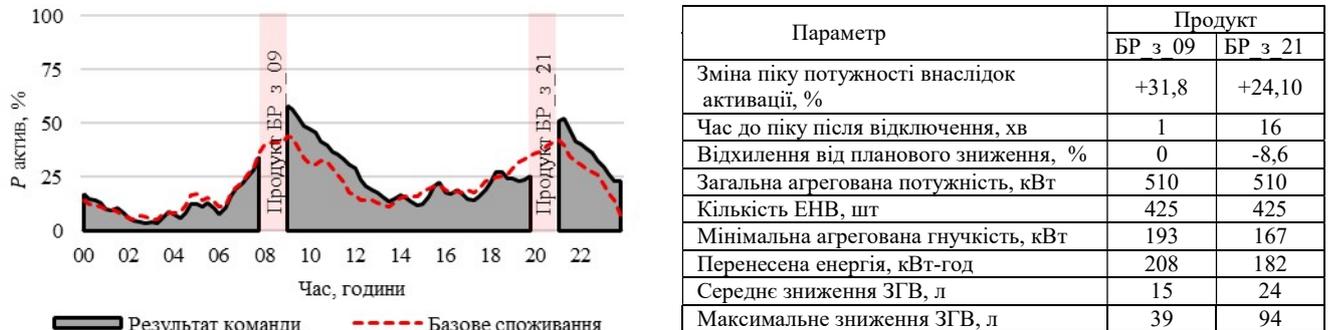


Рис. 8

Ранковий період демонструє типовий рівень активності ЕНВ у базовому режимі. Припускається, що активація команди агрегатора з 08:00 до 08:59 забезпечує повне відключення всіх ЕНВ. Після завершення активації у проміжку з 09:00 до 10:30 спостерігається ефект відскоку де активність перевищує базовий рівень і сягає близько 60%, що свідчить про відкладений процес нагріву. У денний період активність залишалася вищою за базову до 14:00, однак далі фіксується спад навантаження, що вказує на перенесення частини попиту на інші періоди. Вечірній сценарій демонструє дещо знижене споживання порівняно з базовим режимом, натомість у період активації з 20:00 по 20:59 навантаження планово повністю відсутнє. Після завершення команди знову фіксується ефект відновлення, однак меншої амплітуди порівняно з ранковим, що свідчить про часткове покриття потреб в електричній енергії на нагрів води у впродовж дня.

У ранковому періоді енергоспоживання відновлюється швидше, а пік після активації перевищує пікове навантаження без активації на 31,8%, тоді як увечері лише на 24,1%. У вечірній активації було зафіксовано зниження від планового рівня на 8,6% через вплив ранкової активації та зміну графіка споживання електричної енергії на нагрів. Загальний обсяг перенесеної енергії склав 208 кВт-год для ранкового продукту та 182 кВт-год – для вечірнього. Середнє зниження ЗГВ становило 15 л вранці та 24 л ввечері, а максимальне зменшення в окремих ЕНВ – 39 л і 94 л відповідно.

Встановлено, що ранкова активація сприяє зниженню вечірнього пікового навантаження. Це пояснюється зміщенням періодів роботи частини ЕНВ у міжпікові години. Такий взаємозв'язок має вплив на оптимізацію торгових стратегій агрегатора, оскільки вимагає комбінувати послідовні ранкові та вечірні продукти, враховуючи накопичувальний ефект їхнього застосування.

Аналіз результатів моделювання показав, що в моменти активації лише 40–50% ЕНВ перебувають у фазі нагріву, тобто є включеними в роботу. Це зумовлено тепловою інерційністю, споживчими звичками та особливостями керування термостатом. Відтак, за номінальної потужності одного пристрою 1,2 кВт для формування гарантованого 1 МВт ресурсу на балансуючому ринку недостатньо просто агрегувати еквівалент цієї потужності близько 850 ЕНВ. З урахуванням фактичного рівня споживання необхідно масштабувати групу з коефіцієнтом резервування 2–2,5. У результаті задля забезпечення стабільного 1 МВт продукту в ранковому періоді потрібно близько 1850 ЕНВ, у вечірньому – до 2150 пристроїв. Це підкреслює необхідність врахування реальної активності споживачів під час проектування агрегованих гнучких ресурсів.

Задля забезпечення ефективної участі агрегатора на різних сегментах ринку електричної енергії необхідно комплексно враховувати техніко-економічні чинники, що впливають на оптимізацію його операційної діяльності та формування доходів. Очікується, що основні прибутки агрегатора будуть формуватися за рахунок надання допоміжних послуг на РДП та участі на БР. РДП є найбільш стабільним джерелом доходу завдяки оплаті резервування потужності та можливості отримання додаткового прибутку у разі активації резерву. Водночас, розвиток конкуренції та транскордонних платформ зумовлює поступове зниження маржинальності на цьому сегменті.

Скорочення часу торгівлі буде важливим для агрегаторів, що керують великою кількістю побутових споживачів, оскільки забезпечує оперативніше реагування на відхилення, ефективніше використання гнучкості та зменшення цінових ризиків. У поєднанні з точнішим прогнозуванням споживання це сприяє глибшій інтеграції агрегаторів у короткострокові ринкові продукти та підвищує загальну ефективність управління попитом.

Планування торгових стратегій агрегатора визначають наступні основні фактори.

1. Аналіз цінових сигналів, зокрема середньозважені ціни ринку «на добу наперед» та внутрішньодобовому ринку, а також аналіз оперативних даних ОСП щодо роботи БР та РДП, які дають змогу здійснювати внутрішньодобове прогнозування та виявляти ринкові тенденції.

2. Оцінка активів гнучкості, що включає як фізичну здатність споживачів змінювати рівень свого споживання енергії, так і прогнозування їхньої участі на ринку.

3. Операційні та технічні вимоги, наприклад, подання ставок у конкретний час доби або мінімальний обсяг ставки, а також вимоги до конкретних ринкових продуктів по часу реакції та зміни потужності.

4. Оцінка потенційних вигод та витрат під час подачі пропозицій, оскільки окрім доходів агрегатор повинен враховувати витрати на збалансування власного портфеля, а також можливі штрафи за невиконання зобов'язань перед ринком.

Реалізація продуктів агрегатора на ринку електричної енергії включає етапи, наведені на рис. 9.

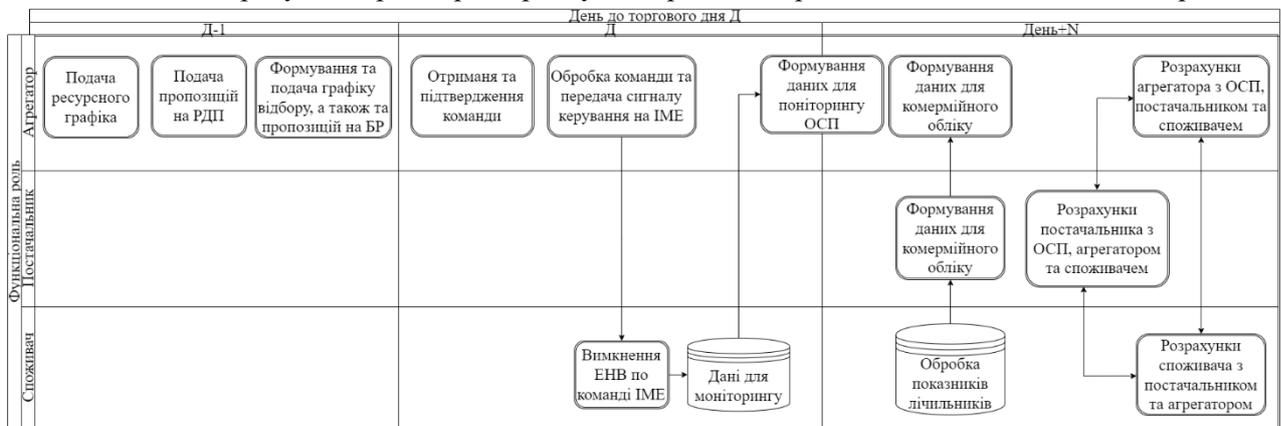


Рис. 9

Бар'єри та перспективи впровадження ЕНВ у програми реагування на попит.

Незважаючи на технологічний прогрес і зростаючу потребу в гнучкості електроенергетичних систем, в усьому світі побутові споживачі залишаються мало інтегрованими у програми реагування на попит. Однією з ключових причин цього є обмежена поінформованість споживачів про переваги та механізми дії програм реагування на попит. Багато споживачів не розуміють, як можна змінити свої енергоспоживчі звички без шкоди для комфорту, і, натомість, обирають прості, але менш ефективні методи економії. Як наслідок, значний потенціал керування навантаженням залишається невикористаним [11].

Тому ще одним актуальним завданням є розробка інтуїтивно зрозумілих, технічно простих і поведінково прийнятних стратегій користування електроприладами, які споживачі зможуть легко впровадити у повсякденне життя. Ключову роль у цьому відіграє двосторонній зв'язок між пристроями та системою управління агрегатора. Особливо це стосується ЕНВ, які здатні не лише отримувати сигнали від диспетчерських центрів, але й надсилати важливу інформацію про свій поточний стан. Це забезпечує надійний контроль за виконанням команд, своєчасне виявлення збоїв.

Учасники не завжди чітко усвідомлюють свою роль, очікувані результати або наслідки участі, що знижує мотивацію до залучення. Це вимагає впровадження якісної інформаційно-просвітницької підтримки: доступних інструкцій, багатоканальної комунікації, наочних прикладів і пояснень, що повторюються з достатньою частотою. Регулярний моніторинг рівня задоволеності учасників, інтерактивні платформи зворотного зв'язку, а також персоналізовані рекомендації щодо участі у програмі реагування на попит дають змогу мінімізувати бар'єри сприйняття. Важливо враховувати й поведінкові чинники: споживачі часто не бажають змінювати звичний спосіб життя, навіть якщо їм пропонують фінансову вигоду, через психологічні бар'єри, небажання втратити контроль над побутовими приладами або низьку довіру до нових технологій.

Але найпотужнішим інструментом подолання цих бар'єрів залишаються економічні стимули. Прямі виплати, знижки на рахунки або бонуси за участь здатні активізувати інтерес до програм. Втім, рівень стимулу має відповідати очікуванням і витратам часу чи зусиль споживача. Якщо винагорода сприймається як незначна, рівень залучення залишатиметься низьким.

Крім того, довіра до енергетичних компаній і операторів систем є вирішальним фактором. Споживачі можуть відмовлятися через страх втрати приватності, відсутності прозорості у використанні даних або негативний досвід. Тому важливо впроваджувати чіткі, прозорі правила участі, гарантувати захист даних та відкрито комунікувати умови і спільну вигоду від взаємодії.

Висновки.

1. Встановлено, що побутові ЕНВ в Україні мають значний потенціал як гнучкий ресурс у програмах реагування на попит за умови врахування їхніх технічних параметрів, поведінки споживачів та ефективної взаємодії між агрегатором, споживачами та ОСП.

2. Створено дослідну установку, на основі якої зібрано великий обсяг деталізованих історичних даних про реальні режими роботи ЕНВ та побудовано комп'ютерну математичну модель ЕНВ, що забезпечило високоточне моделювання теплових процесів і стало основою для подальшого дослідження ресурсу реагування на попит.

3. Промодельовано різні сценарії роботи ЕНВ з урахуванням рівня НГВ, що дало змогу оцінити компроміс між комфортом споживача та енергетичною гнучкістю. Результати техніко-соціального аналізу свідчать про ресурсний потенціал реагування на попит агрегованих ЕНВ об'ємом 80–100 л на рівні близько 3 ГВт.

4. Запропоновано дворівневу архітектуру інфраструктури для інтеграції ЕНВ у системи реагування на попит на основі дворівневої моделі агрегатора з використанням стандарту OpenADR.

5. Проведено моделювання участі різних ЕНВ у програмах реагування на попит через механізми агрегування, що дало змогу сформувавши ключові етапи реалізації продуктів агрегатора: формування ресурсу, створення агрегованих продуктів і їх реалізація на ринку електричної енергії.

6. Оцінено ефективність запропонованих продуктів для балансуючого ринку, їхній вплив на споживання в інші години доби. Показано, що найбільш перспективним підходом агрегування є сценарний підхід до формування портфеля ЕНВ, що забезпечує баланс між технічною гнучкістю споживання і комфортом користувачів.

7. Визначено умови, за яких інтеграція ЕНВ у системи реагування на попит буде ефективною, обсяг резервування портфеля агрегатора та гостру потребу в поєднанні технологічних рішень, економічних стимулів і інформаційної підтримки споживачів.

1. Кіянчук В.М., Махотіло К.В. Участь побутових споживачів на енергетичних ринках через керування попитом. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2023. № 9–10. С. 6–35. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.09.01>.
2. Kiianchuk V., Makhotilo K. Modeling of Domestic Electric Water Heaters for Demand Response. IEEE 5th KhPI Week on *Advanced Technology* (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 07-11 October 2024. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015>.
3. Кіянчук В.М., Махотіло К.В. Оцінка особливостей ресурсу водонагрівачів для реагування на попит в енергосистемі. *Вісник ВПІ*. 2025. Вип. 2. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-71-80>.
4. Кіянчук В.М., Махотіло К.В. Організація роботи агрегатора для інтеграції побутових споживачів у програми реагування на попит. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2025. № 3 (206). С. 31–48. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.03.03>.
5. Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України у 2021 році: статистичний збірник. Державна служба статистики України. Київ: Держстат України, 2021. 89 с.
6. Кириленко О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Сопель М.Ф. SMART-моніторинг електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 48–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>.
7. OpenModelica.: URL: <https://openmodelica.org/> (дата звернення 07.07.2025).
8. Коцар О.В., Довгий С.С. Підвищення продуктивності систем енергетичного менеджменту МСП через управління даними енергомоніторингу. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2025. № 2. С. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327133>.
9. OpenADR. URL: <https://www.openadr.org/> (дата звернення 07.07.2025).
10. LoadProfileGenerator. URL: <https://www.loadprofilegenerator.de/> (дата звернення 07.07.2025).
11. Stampatori D., Rossetto N. From hesitation to participation: examining behavioural barriers to engage customers in flexibility markets. *Current Sustainable Renewable Energy Reports*. 2024. Vol. 11. Pp. 127–135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40518-024-00241-w>.

INTEGRATION OF DOMESTIC ELECTRIC WATER HEATERS INTO DEMAND RESPONSE MECHANISMS OF THE POWER SYSTEM

V.M. Kiianchuk, K.V. Makhotilo
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.
E-mail: Vladyslav.Kiianchuk@ieec.khpi.edu.ua.

This study presents an extensive investigation of domestic electric storage water heaters (ESWHs) as a flexible demand-side resource in the power system. An analysis of the Ukrainian residential water heater market is conducted, evaluating both their prevalence and technical potential for participation in demand response programs. An experimental ESWH testbed has been designed and implemented to collect high-precision data on thermal processes within the tank and electricity consumption, serving as a foundation for model validation. A computational mathematical model of ESWH thermal and electrical dynamics has been developed and validated, incorporating both physical system parameters and consumer usage behavior. Using this model, Pareto optimality curves were constructed to identify the trade-off between user comfort levels and ESWH demand-side flexibility. Acceptable consumer comfort temperature ranges and the response of ESWHs to control signals from an aggregator have been established. A two-level system architecture is proposed for integrating ESWHs into demand-side management frameworks using the OpenADR protocol, enabling effective coordination between aggregators, distribution and transmission system operators, and end-users. To validate the proposed approach, experimental simulations were carried out to model the aggregated response of ESWH users to demand activation signals. The research identifies key stages in the development of demand response market products: resource base formation, creation of aggregated flexibility products, and their deployment in the electricity market. Furthermore, the study analyzes barriers hindering the implementation of demand response programs in the residential sector, including low consumer awareness, lack of economic incentives, and limited technological readiness. References 11, table 1, figures 9.

Key words: demand response, water heater, aggregator, energy efficiency, smart grid, energy monitoring, electricity market, load aggregation.

1. Kiianchuk V.M., Makhotylo K.V. Participation of household consumers in energy markets through demand-side management. *Energozberezhennia. Energetyka. Energoaudit*. 2023. No 9–10 (187–188). Pp. 6–35. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.09.01>.
2. Kiianchuk V., Makhotylo K. Modeling of domestic electric water heaters for demand response. 2024 IEEE 5th KhPI Week on *Advanced Technology* (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine. 07-11 October 2024. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015>.
3. Kiianchuk V.M., Makhotylo K.V. Assessment of electric water heaters' demand response resource characteristics in the power system. *Visnyk VPI*. 2025. No 2. Pp. 71–80. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-71-80>.
4. Kiianchuk V.M., Makhotylo K.V. Aggregator operation organization for household demand response integration. *Energozberezhennia. Energetyka. Energoaudit*. 2025. No 3 (206). Pp. 31–48. (Ukr) DOI: <https://doi.org/C10.20998/2313-8890.2025.03.03>.
5. State Statistics Service of Ukraine. Social and demographic characteristics of households in Ukraine in 2021: Statistical collection. Kyiv: Derzhstat Ukrainy, 2021. 89 p. (Ukr)
6. Kyrylenko O.V., Stohnii B.S/, Denysiuk S.P., Sopol M.F. SMART monitoring of power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 5. Pp. 48–62. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>.
7. OpenModelica. URL: <https://openmodelica.org> (accessed at 14.03.2025).
8. Kotsar O.V., Dovhyi S.S. Improving the performance of SME energy management systems through energy monitoring data management. *Energetyka: ekonomika, tekhnologii, ekologiia*. 2025. No 2. Pp. 7–11. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327133>.
9. OpenADR. URL: <https://www.openadr.org/> (accessed 07.07.2025).
10. LoadProfileGenerator. URL: <https://www.loadprofilegenerator.de/> (accessed at 07.07.2025).
11. Stampatori D., Rossetto N. From hesitation to participation: examining behavioural barriers to engage customers in flexibility markets. *Current Sustainable Renewable Energy Reports*. 2024. Vol. 11. Pp. 127–135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40518-024-00241-w>.

Надійшла 17.07.2025
Прийнято 25.12.2025