

ОЦІНКА ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕСУРСУ ВОДОНАГРІВАЧІВ ДЛЯ РЕАГУВАННЯ НА ПОПИТ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Досліджено потенціал електричних накопичувальних водонагрівачів (ЕНВ) як ресурсу для реагування на попит у енергосистемі. Основну увагу зосереджено на оцінюванні впливу різних параметрів та умов ЕНВ на їхню ефективність, комфорт споживачів та здатність до участі у програмах реагування на попит. Проаналізовано історичні дані про споживання електричної енергії, отримані під час досліджень, що базуються на спостереженнях за реальними дослідними установками.

Детально розглянуто вплив об'єму бака ЕНВ, температурних налаштувань та режимів роботи на енергоефективність та комфорт споживачів. У результаті аналізу встановлено оптимальні параметри налаштувань, які дозволяють забезпечити баланс між енергоефективністю системи та зручністю для споживачів. Особливу увагу приділено стратегіям управління ЕНВ, які мінімізують рівень дискомфорту споживачів під час їхнього використання, зокрема за рахунок оптимальних за Парето комбінацій об'єму та температури.

Проаналізовано вплив сезонних факторів, параметрів вибору об'єму ЕНВ, а також налаштувань і режимів роботи, які визначають ефективність використання ЕНВ у програмах реагування на попит.

Також визначено потенціал водонагрівачів для реагування на попит в Україні з урахуванням їхньої загальної кількості, переважна більшість яких є представлена ЕНВ вертикального типу монтажу. Окремо розглянуто вибрані ЕНВ середнього об'єму, які найпопулярніші для побутового використання і мають високий потенціал для гнучкого управління попитом. В результаті розрахунків визначено кількість ЕНВ різних типів і потужностей, що дозволяє оцінити їхній вклад у загальний потенціал реагування на попит в енергосистемі.

Запропоновані підходи можуть бути корисними для подальшого впровадження програм реагування на попит, спрямованих на підвищення енергоефективності та надійності енергосистеми зі збереженням високого рівня комфорту споживачів.

Ключові слова: реагування на попит, водонагрівач, енергоефективність, балансування, агрегатор.

Вступ

В усьому світі проблеми енергоефективності та енергетичної безпеки стають все важливішими, оскільки зростаючі потреби в енергії змушують шукати нові технології управління енергетичними ресурсами. Рациональне використання та розробка нових методів управління споживанням електричної енергії дозволять зменшити витрати для споживачів, а також підтримувати курс на сталий розвиток відновлюваної енергетики, забезпечуючи енергетичну систему ресурсами для балансування.

Ключовим ресурсом для реагування на попит можуть стати побутові водонагрівачі, оснащені технологіями «розумного» будинку, такими як програмовані розетки та «розумні» лічильники. Водонагрівачі можуть накопичувати тепло в часи низьких тарифів або коли є надлишок електричної енергії від ВДЕ, і знижувати навантаження на мережу в пікові періоди. Проте через варіативність їхнього використання та багатогранний вплив різних факторів на комфорт споживачів визначення потенціалу водонагрівачів як ресурсу для реагування на попит досі залишається складною, неповністю розв'язаною задачею. У процесі дослідження потенціалу ЕНВ для реагування на попит важливо оцінити їхні ресурсні можливості для залучення до відповідних програм агрегатора. Також необхідно врахувати низку факторів, що впливають на комфорт споживачів та ресурс реагування на попит, серед яких об'єм та температура води в баку, а також параметри використання гарячої води.

Для забезпечення ефективного реагування на попит доцільно використовувати технічні засоби, які дозволяють вимірювати потужність та здійснювати управління включенням/виключенням ЕНВ дистанційно. Це можливо за допомогою IoT технологій, які дозволяють контролювати ЕНВ без необхідності змінювати його конструкцію. Водночас для вимірювання температури води в баку часто використовуються неінтрузивні методи, які не вимагають модифікації пристроїв.

Визначення оптимальних часових проміжків для реагування на попит є ключовим елементом у формуванні торгових стратегій на ринку електричної енергії, яке має враховувати не лише обмеження ресурсу для реагування на попит, але й потребу в балансуючій електричній енергії, допоміжних послугах та максимізацію прибутку учасників. Програми реагування на попит також повинні враховувати режими користування приладами, аби не порушувати звичний розпорядок дня споживачів і не впливати на їхній комфорт. Згідно з правилами ринку [1], агрегатори одиниць споживання не мають зобов'язань щодо подачі пропозицій на балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг. Відповідно, це дозволяє агрегатору вільно розробляти торгові стратегії подачі пропозицій, які враховують як потреби ринку, так і вимоги комфорту споживачів.

Метою роботи є оцінка потенціалу водонагрівачів як ресурсу для реагування на попит, а також визначення впливу різних факторів впливу на енергоефективність та комфорт споживачів.

Визначення факторів впливу на ресурс ЕНВ

В дослідженні використані історичні дані про споживання електричної енергії, отримані за допомогою експериментальної установки, детально описаної в роботі [2]. Дані базуються на спостереженнях за реальним ЕНВ, оснащеним розумним лічильником та реєстратором температури, що дозволяє здійснити точний моніторинг і аналіз споживання електричної енергії та температурних режимів.

Базове споживання електричної енергії ЕНВ залежить від низки факторів, які можна поділити на кілька основних категорій:

- технічні (ємність, електрична потужність та клас енергоефективності водонагрівача);
- сезони (пора року, середньодобова температура навколишнього середовища, а також вхідна та задана температура для нагріву води);
- споживчі (склад сім'ї, тип зайнятості, поведінкові особливості);
- інфраструктурні (якість та безперервність водопостачання, довжина гарячих трубопроводів, наявність та якість опалення у зимовий період);
- календарні (робочій, вихідний або святковий день).

Розуміння впливу цих факторів є важливим для побудови торгових стратегій, визначені ресурсу, а також оптимізації їхньої роботи у рамках програм реагування на попит. Аналіз впливу сезонних факторів показав, що вони мають особливу значущість, оскільки безпосередньо впливають на динаміку навантаження протягом року, тепловтрати, ефективність нагріву води та, зрештою, на рівень комфорту споживачів.

Вплив сезонних факторів на споживання та ресурс ЕНВ для реагування на попит

Сезонні коливання, зокрема зміна середньодобової температури навколишнього середовища, а також вхідної холодної води та бажаної температури гарячої води, значною мірою визначають потребу у додаткових енергетичних ресурсах для нагріву. Також важливим є вплив тривалості опалювального періоду, коли гаряча вода може використовуватись інтенсивніше.

На рис.1а показано помісячне споживання електричної енергії дослідним водонагрівачем протягом року з розбивкою по місяцях.

У зимовий період, особливо під час морозів, водонагрівачі потребують значно більше енергії для підтримання температури води на бажаному рівні. Це пов'язано з тепловтратами, які виникають через недостатню ізоляцію. Температура навколишнього середовища, що опускається нижче нуля, сприяє суттєвому збільшенню витрат на нагрівання води. На відміну від цього, влітку, коли температура зовнішнього середовища підвищується, водонагрівачі споживають менше електроенергії, оскільки температура вхідної холодної води є вищою, а бажана температура нагріву води — меншою.

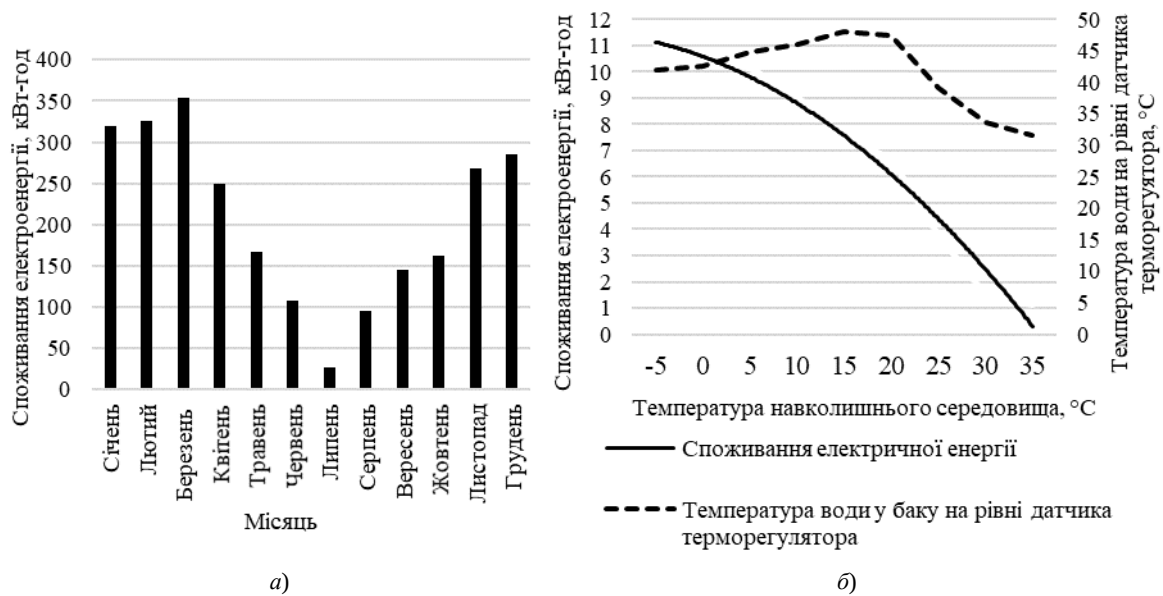


Рис. 1. Аналіз споживання електричної енергії дослідним ЕНВ: *a* — помісячне споживання електричної енергії; *б* — добове споживання електричної енергії залежно від температури навколишнього середовища

Рекомендації виробників водонагрівачів [3] підкреслюють важливість сезонної адаптації температури води для забезпечення ефективності гарячого водопостачання (ГВП) та комфорту. У зимовий період оптимальні уставки для нагріву води зазвичай становлять 55...60 °C. Це компенсує більші тепловтрати через зовнішнє охолодження бака та холоднішу вхідну воду. У літній період тепловтрати у навколишнє середовище мінімальні, рекомендована уставка нагріву становить 45...50 °C.

Для формування графіків на рис. 1 використовувалися реальні дані, отримані впродовж року спостереження за дослідним ЕНВ. Кожному окремому дню спостережень присвоєно середньодобові значення температури навколишнього середовища, відповідне до метеорологічних даних. На основі цього розраховані середньодобові значення споживання електричної енергії ЕНВ та середньодобова температура води в баку для кожного дня. В подальшому дані щодо температури навколишнього середовища розподілені у діапазоні від -5 °C до +35 °C з інтервалом у 5 °C. Для кожного інтервалу усереднено всі значення споживання електроенергії та температури води, які відповідали середньодобовим температурам, що потрапляли у цей інтервал

$$x_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{i,j}, \quad (1)$$

де x_i — усереднене значення параметра (споживання електричної енергії або температура води) для інтервалу i ; n_i — кількість днів, середньодобова температура навколишнього середовища яких потрапляє в інтервал i (за час спостережень це від 5 до 50 для кожного діапазону); $x_{i,j}$ — значення параметра для дня j у межах температурного інтервалу i .

Отримані середні значення для кожного температурного інтервалу i використані для побудови графіків. На рис. 1б показані середньодобові графіки споживання електричної енергії та температури води у баку дослідного ЕНВ залежно від температури навколишнього середовища. Результати дослідження підтвердили зв'язок між температурою навколишнього середовища та енергоспоживанням ЕНВ. Температурні налаштування ЕНВ адаптуються до сезонних умов: для підтримання комфорту споживачів максимальна уставка нагріву на рівні 60 °C використовується взимку, за температури нижче +5 °C. У весняно-осінній період уставка знижується до 55 °C, а влітку — до 50 °C і менше, залежно від зростання температури навколишнього середовища. За температури понад +25 °C уставка нагріву знижується до 40 °C, оскільки висока температура навколишнього середовища зменшує тепловтрати та потребу у гарячій воді. У разі зниження температури навколишнього середовища споживання електричної енергії зростає: за -5 °C споживання досягає 11,04 кВт-год, тоді як за +35 °C — зменшується до 1,13 кВт-год. До того ж, зі зниженням температурної уставки для нагріву води в баку зменшується кількість гарячої води, доступної для використання, що безпосередньо впливає на ефективність системи. За низьких

температур навколишнього середовища, наприклад, близько -5°C , середня температура води в баку на рівні датчика терморегулятора становить лише $41,96^{\circ}\text{C}$, тоді як за $+25^{\circ}\text{C}$ вона сягає $39,06^{\circ}\text{C}$, а у разі $+35^{\circ}\text{C}$ — знижується до $31,50^{\circ}\text{C}$.

Проведене натурне дослідження тривалістю понад 1,5 роки підтвердило правильність рекомендацій виробників водонагрівачів щодо оптимальних уставок температури, а також необхідність їхнього коригування в залежності від сезону та температури навколишнього середовища. Адаптація режимів роботи ЕНВ до сезонних змін дозволяє оптимізувати енергоспоживання без шкоди для комфорту споживачів. Такий підхід підвищує енергоефективність ГВП, зменшує витрати електроенергії та забезпечує баланс між вартістю послуги і задоволенням потреб споживачів. Відповідне налаштування параметрів нагріву води є ключовим елементом стратегій управління водонагрівачами в програмах реагування на попит. До того ж, зменшення навантаження на мережу, а також можливість вирівнювання добового графіка навантаження, сприяють підвищенню ефективності енергоспоживання, що дозволяє зменшити витрати на виробництво та постачання електроенергії, оптимізуючи економічні витрати.

Вплив об'єму та налаштувань ЕНВ на енергоефективність та комфорт

Ключовим параметром енергоефективності ЕНВ та комфорту кінцевих споживачів є співвідношення між об'ємом нагрітої води, що зберігається у баку, та заданою температурою її нагріву. Відповідно до мети роботи, важливою задачею є визначення межі комфорту в просторі параметрів об'єму та температурної уставки ЕНВ, а також порівняння різних ЕНВ на цій межі за енергоефективністю, комфортом, запасу гарячої води (ЗГВ) і, відповідно, ресурсом реагування на попит. Для моделювання роботи ЕНВ різних параметрів використана математична модель ЕНВ зі стратифікацією шарів води у баку, запропонована в статті [4] та адаптована у роботі [2]. Три складові математичної моделі ЕНВ описують теплові та електричні процеси в трьох фазах його роботи: спокій, нагрівання та злив.

Фаза I — спокій, розглядає стан, коли ЕНВ не нагріває воду і не відбувається злив. Температурний профіль у баку змінюється лише через теплові втрати і дифузію тепла. Математична модель використовує одномірне рівняння теплопровідності з граничними умовами, що задають рівновагу теплових потоків через стінки бака. Це дозволяє оцінювати повільну зміну температури води.

Фаза II — нагрівання, розглядає стан, коли ЕНВ нагріває воду і не відбувається злив води. У баку виникає турбулентність, яка створює зону ідеального змішування (плато температури) від дна бака до певної висоти $x_p(t)$. Вище цієї межі вода залишається поза впливом нагріву і знаходиться у фазі спокою. Рівняння енергетичного балансу визначає, як тепло нагрівального елемента розподіляється в зоні плато, що дозволяє розрахувати висоту $x_p(t)$ і температуру плато $T_p(t)$.

Фаза III — злив, розглядає процес відбору гарячої води з одночасним надходженням холодної. У баку формується зона змішування висотою $x_b(t)$, де вода має однорідну температуру $T_b(t)$. Під час цього режиму домінуючим явищем вважається турбулентність, викликана рухом води, теплові втрати і робота нагрівального елемента враховуються спрощено. Температура і межа змішування описуються через енергетичний баланс, з урахуванням швидкості зливу води і форми насадки на трубі подачі холодної води.

Стратифікація води у ЕНВ означає утворення шарів води з різною температурою, де найгарячіша вода зберігається в верхньому шарі, а холодніша — в нижньому. Це природне явище, зумовлене різницею в густині між гарячою та холодною водою. У побутових системах ГВП важливо забезпечити наявність достатньої кількості достатньо гарячої води в верхніх шарах, оскільки саме з цієї частини ЕНВ споживачі беруть воду для щоденних потреб. Нижчі шари води не впливають на комфорт, оскільки відбір гарячої води здійснюється зверху баку ЕНВ.

Саме тому у програмах реагування на попит або у разі оптимізації енергоспоживання розуміння стратифікації води є критично важливим аспектом. Доступність гарячої води у верхньому шарі безпосередньо впливає на здатність задовольняти потреби у комфорті. Стратифікацію води обов'язково слід враховувати під час оцінювання запасів води в баку ЕНВ, зокрема у разі налаштування режимів роботи для підвищення енергоефективності або адаптації до сезонних змін температури.

Основне завдання полягає у визначенні оптимальної стратегії нагріву води, що дозволяє мак-

симізувати прибуток від участі в програмі, при цьому забезпечуючи бажаний рівень комфорту. Для цього необхідно визначити, скільки гарячої води доступно в кожний окремо взятий момент часу.

Санітарні вимоги до температури гарячої води враховані відповідно до стандарту DIN EN 1111 [5], а також роботи [4], де мінімальні санітарні вимоги визначені на рівні 40 °С. Температура води 40 °С на виході зі змішувача визначається як комфортна для більшості споживачів, оскільки вона підходить для більшості побутових потреб, таких як душ, миття посуду або прання. Вода нижче цієї температури буде дискомфортною, змушуючи споживача чекати догріву або використовувати воду, яку він вважатиме «холодною». У моделі визначення доступного ЗГВ за температури 40 °С базується на аналізі температурного профілю у баку. Шари води з температурою вище 40 °С оцінюються як доступні для використання, а холодніші шари вважаються «холодною» водою.

Однією з проблем у разі залучення ЕНВ до реагування на попит є перехід від індивідуального управління до групового. Для кожного окремого споживача вимоги до комфорту можуть відрізнятися: хтось надає перевагу більшій температурі гарячої води, хтось — більшому обсягу води помірної температури. У групових системах складніше передбачити пікові потреби, оскільки вони варіюються залежно від часу доби та індивідуальних звичок.

Розроблена для цього дослідження модель [2] ЕНВ вирізняється здатністю точно оцінювати температуру в баку в реальному часі, дозволяючи враховувати поведінкові особливості споживачів. Вона забезпечує високу точність розрахунків зі збереженням відносно низької обчислювальної складності, що дозволяє легко її адаптувати до агрегованих обчислень. Завдяки цьому прогнозування і керування груповим споживанням стає точнішим.

Для аналізу межі зон комфорту та дискомфорту ГВП вибрано 11 ЕНВ однакової потужності — 2 кВт, які мають ідентичні показники енергоефективності. В ході експерименту моделювалися ЕНВ однакового класу енергоефективності та рівня теплоізоляції, які встановлені в опалюваному приміщенні з температурою навколишнього середовища +23 °С. Всі ЕНВ розташовані якнайближче до точок розбору, що дозволяє нехтувати втратами тепла в трубопроводах ГВП.

Для всіх ЕНВ задавався один графік розбору гарячої води, показаний на рис. 2, проте вони відрізнялися за об'ємом бака від 50 до 100 літрів, з кроком у 5 літрів. Це дозволило провести порівняння їхніх характеристик та визначити вплив об'єму та величини уставки температури на ЗГВ і добові витрати електричної енергії.

Першою проблемою визначення межі комфорту є складність отримання типового графіка споживання гарячої води через численні фактори, такі як індивідуальні звички споживачів, сезонні коливання та різниця в типах будівель і обладнання. Споживчі моделі варіюються залежно від кількості мешканців домогосподарства, часу доби та інших особливостей. До того ж, відсутність єдиної методології збору даних, різноманітність методів вимірювання та обмеженість даних ускладнюють створення точного типового графіку. Для цього дослідження відібрано типовий приклад реального графіка споживання, отриманого під час проведення натурного експерименту та збору відповідного масиву даних. Графік розбору гарячої води відповідає перехідному сезону між зимою та літом і характеризується температурою навколишнього середовища +20...25 °С та температурою вхідної води близько 15 °С, яка залежно від сезону може становити від +5 до +23 °С.

Графік розбору теплої води у точках відбору охоплює 6 періодів, загальний обсяг використаної води з температурою 40 °С становить 212 літрів. Вранішній період розбору триває з 6¹⁴ до 6³⁸ і становить 48 л. Обідній період з 11⁵⁹ до 12¹⁴ включає 38 л, післяобідній з 14⁵⁹ до 15⁰³ — 7 л. Найбільший вечірній розбір відбувається з 17⁵⁹ до 18⁴⁷ та становить 103 л. Два нічних періоди тривають з 21⁵⁹ до 22⁰⁵ та з 22⁵³ до 22⁵⁷ мають споживання 7 та 5 л відповідно.

Другою проблемою у визначенні межі комфорту є отримання точних даних про ЗГВ у ЕНВ, яке ускладнюється через специфіку налаштувань регулювання температури ЕНВ. Більшість сучасних ЕНВ дозволяють встановлювати температуру з певним кроком, зазвичай до 1 °С. Це означає, що точність у визначенні ЗГВ залежить не лише від об'єму води, але також від точності налаштування температури. Кожен ЕНВ має певний температурний діапазон, в якому він може працювати, і на-

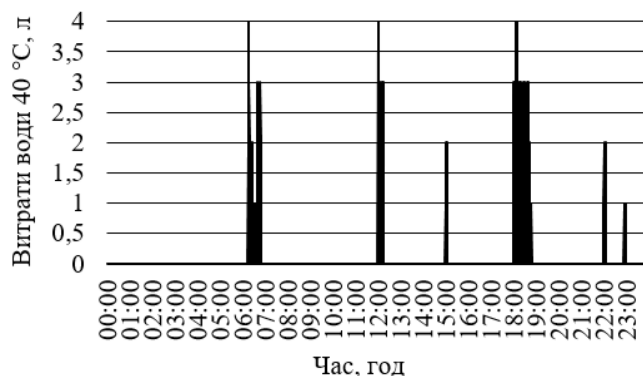


Рис. 2. Графік розбору теплої води

віль невеликі зміни в температурі можуть впливати на кількість доступної гарячої води. Якщо температура води в баку налаштовується недостатньо точно або з великим кроком, це може призвести до значних коливань ЗГВ.

Оскільки з технічної точки зору неможливо встановити температуру нагріву з точністю до десятих або сотих °C, у дослідженні використовувалося значення уставки, які забезпечують заданий рівень ЗГВ, округлені з кроком 0,5 °C.

Під час аналізування спочатку розглядається випадок, коли ЗГВ встановлюється на мінімально можливий рівень, що передбачає забезпечення гарячої води виключно за потребою в період найбільшого розбору, тобто без додаткового запасу на випадок збільшення споживання. Далі досліджується, як ЗГВ впливає на межу комфорту та споживання електроенергії. Це дозволяє проаналізувати компроміс між комфортом і ефективністю.

Після отримання змодельованих даних побудовано криву, що ілюструє оптимальні комбінації об'єму та температури для ЕНВ, які у момент максимального споживання забезпечують заданий рівень ЗГВ: 0 літрів, 20 літрів та 0 літрів у разі виконання команди диспетчера на годинне відключення ЕНВ для здійснення реагування на попит.

Такі значення залишкових ЗГВ визначені з урахуванням запасу на непередбачувані потреби у випадку збільшення розбору чи обмеження споживання електроенергії для економії. Одногодинне відключення імітує команду агрегатора, спрямовану на перенесення навантаження, зберігаючи достатній рівень комфорту споживачів завдяки попередньому акумулюванню теплової енергії [6].

У цьому експерименті здійснювалось моделювання енергоспоживання системи протягом п'яти послідовних днів з метою визначення чистого споживання енергії за один окремо взятий день, при цьому особливу увагу приділено мінімізації впливу початкового стану заряду ЕНВ. На початку першого дня ЕНВ повністю нагріто (100 % заряду), що суттєво впливало на результати вимірювань, оскільки ЕНВ починав перший день на рівні заряду 100 % і закінчував його приблизно на рівні 95 %. Впродовж подальших днів рівень заряду ЕНВ поступово знижувався і стабілізувався приблизно на однаковому рівні на початку і в кінці кожного дня, починаючи з третього дня моделювання. Для точного визначення чистого споживання енергії за один день розраховано загальне сукупне споживання енергії за перші чотири дні і за всі п'ять днів.

Чисте споживання енергії за п'ятий день визначено як різниця між загальним споживанням за п'ять днів і сукупним споживанням за чотири дні, що математично виражається формулою

$$E_{netto}^5 = \sum_{i=1}^5 E_i - \sum_{i=1}^4 E_i, \quad (2)$$

де E_{netto}^5 — чисте енергоспоживання за п'ятий день; $\sum_{i=1}^5 E_i$ та $\sum_{i=1}^4 E_i$ — сукупне енергоспоживання за перші п'ять та чотири дні відповідно.

Цей підхід дозволив виключити вплив початкового стану заряду ЕНВ на результати і забезпечити точне визначення чистого енергоспоживання ЕНВ за окремо взятий день у стабільних умовах, де рівень заряду на початку і в кінці дня є майже однаковим.

На рис. 3а показано простір, у якому кожна точка відповідає зоні «комфортно» або «некомфортно» залежно від заданого рівня комфорту. Межа між цими зонами представлена суцільною вгнутою лінією, яка є кривою Парето. Ця крива, аналогічна оберненій кривій виробничих можливостей, відображає компроміс між об'ємом ЕНВ і температурою, що дозволяє досягти необхідного рівня ЗГВ. Кожна точка на цій межі є рівнозначною з погляду рівня ЗГВ і визначає оптимальні за Парето кривою параметри ЕНВ. Вгнута форма кривої свідчить про те, як збільшенням об'єму ЕНВ для досягнення того ж рівня ЗГВ потрібно знижувати температуру нагрівання.

У нижній половині простору, що лежить нижче межі зони комфорту, особливо для значень ЗГВ, близьких до 0 літрів, спостерігається зона потенційного дискомфорту для споживачів. У цій області недостатній об'єм гарячої води та низька температура нагріву не забезпечують необхідного рівня задоволення ГВП.

Кожна точка на кривій відповідає певній комбінації параметрів об'єму та температури, яка забезпечує конкретний рівень ЗГВ. Крива меж комфорту фактично є увігнутою кривою Парето оптимальності та допомагає візуалізувати залежність між об'ємом та температурою та ЗГВ та витратами електричної енергії. Переміщуючись уздовж кривої, можна знайти різні комбінації параметрів, які забезпечують визначені рівні ЗГВ. Оптимальний баланс між енергоефективністю та комфортом досягається за температури нагріву 55...65 °C залежно від об'єму бака. Обмежен-

ня нагріву дозволяє зменшити навантаження на енергосистему, але вимагає підвищення температури до 56...78 °С для збереження достатнього рівня комфорту.

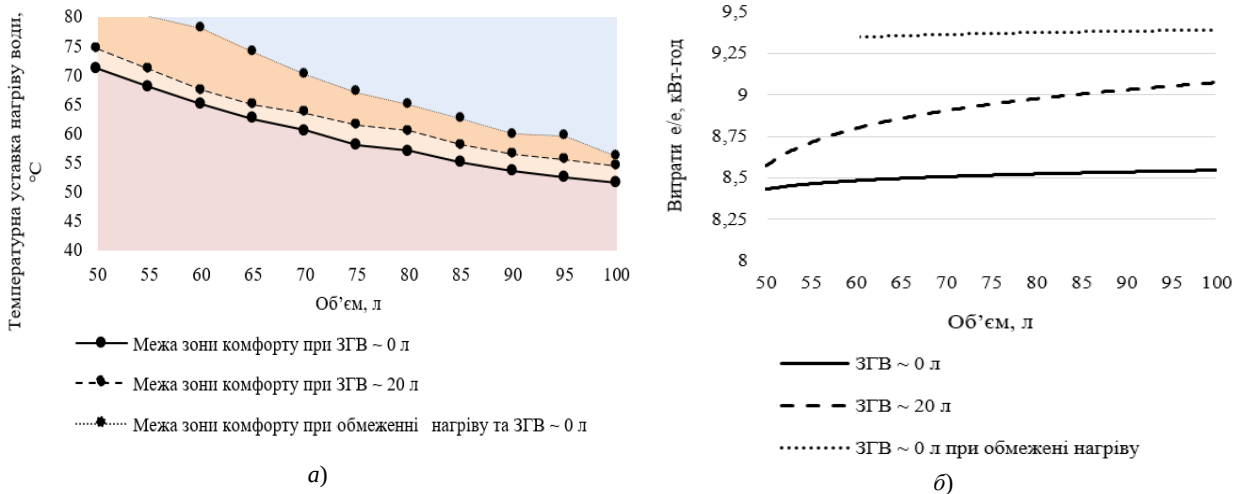


Рис. 3. Криві пар об'єм-температура: а — межі комфорту; б — витрати електричної енергії

Аналіз даних вказує на те, що існує залежність між об'ємом гарячої води ЕНВ та температурою нагріву для підтримання одного ЗГВ. Зі збільшенням об'єму ЕНВ з 50 до 100 літрів температура нагріву знижується з 71 до 51,5 °С. Це зниження відбувається нерівномірно, тобто температура нагріву знижується швидше зі збільшенням об'єму до певної точки, після чого зниження відбувається повільніше. Ця залежність вказує на те, що існує певний компроміс між об'ємом гарячої води та температурою нагріву, який фактично є кривою оптимальності Парето.

На рис. 3б показано взаємну відповідність різних пар об'єм-температура для різних ЗГВ та споживання електричної енергії для ефективного використання ЕНВ. Після визначення межі комфорту в просторі параметрів об'єм-температура можна порівняти різні ЕНВ за енергоефективністю. Основним параметром є добове споживання електроенергії, яке показує як змінюється споживання для різних комбінацій параметрів вздовж межі комфорту та допомагає зрозуміти, які з них забезпечують ефективне використання енергії.

ЕНВ з різними об'ємами ЗГВ відрізняються у споживанні електроенергії, що залежить від кількості води та температури, до якої вона нагрівається. Наприклад, ЕНВ на 50 літрів за температури 71 °С споживає приблизно 8,38 кВт-год електроенергії, з підвищенням температури до 80 °С його споживання електроенергії зростає до 8,47 кВт-год. Водночас якщо для накопичення того ж самого ЗГВ об'єм ЕНВ збільшити до 100 літрів, його температуру слід підтримувати на рівні 51,5 °С, а споживання електроенергії становитиме вже 8,56 кВт-год. Зі зміною об'єму води до 80 літрів і температури до 75 °С, споживання електроенергії зростає до 10,59 кВт-год. Це показує, що більший об'єм води потребує більше енергії для її нагрівання та підтримки необхідної температури.

Оцінка ресурсу ЕНВ для реагування на попит в Україні

Для визначення ресурсного потенціалу ЕНВ можна враховувати загальну кількість водонагрівачів в Україні. За даними соціально-демографічних характеристик домогосподарств України, опублікованим у статистичному збірнику держстату України у 2021 році, вона становить близько 5,7 млн [7], з яких накопичувальні та вертикально встановлені складають відповідно 83,66 та 81,76 % відповідно [2]. Для аналізу потенціалу ЕНВ у програмах реагування на попит враховано лише ЕНВ з об'ємом баку від 80 до 100 літрів, які є найдоступнішими для побутового використання, мають достатній потенціал для гнучкого керування без впливу на комфорт та вибрані на основі аналізу рис. 3а.

Ці дані дозволяють оцінити загальну кількість ЕНВ в Україні, які можуть бути залучені до програм реагування на попит. Подальший аналіз та розподіл ЕНВ за об'ємом баку та потужністю ТЕНа дає можливість визначити їхній внесок та загальний потенціал у реагуванні на попит.

Кількість водонагрівачів кожного типу (за об'ємом і потужністю) обчислюється із загальної кількості ЕНВ, враховуючи коефіцієнти для накопичувальних пристроїв та вертикального монтажу, а також частку конкретного типу на ринку

$$N_{type} = N_{total} \cdot K_{swh} \cdot K_{vert} \cdot S_{type}, \quad (3)$$

де N_{total} — загальна кількість водонагрівачів в Україні; K_{swh} — коефіцієнт, що відображає частку накопичувальних водонагрівачів серед загальної кількості; K_{vert} — коефіцієнт, що вказує на частку водонагрівачів з вертикальним монтажем; S_{type} — частка певного типу водонагрівача за об'ємом та потужністю, яка визначається в залежності від конкретного класу водонагрівачів.

Потенціал водонагрівачів у МВт визначався як добуток кількості водонагрівачів певного типу на середню потужність цього типу

$$R_{type} = N_{type} \cdot P_{avg\ type}, \quad (4)$$

де N_{type} — кількість водонагрівачів конкретного типу, визначено за формулою (3); $P_{avg\ type}$ — середня потужність водонагрівачів конкретного типу.

Для різних класів потужностей середні значення можна оцінити на такому рівні:

- для класу потужності $\leq 1,5$ кВт $P_{avg\ type} = 1,4$ кВт;
- для класу потужності від 1,6 до 2 кВт $P_{avg\ type} = 1,8$ кВт;
- для класу потужності $\geq 2,1$ $P_{avg\ type} = 2,2$ кВт.

Результати розрахунків подані в таблиці та на рис. 4 є приблизними через обмеженість доступних верифікованих даних. Розрахунки базуються на припущеннях, що випливають із доступної статистичної інформації щодо часток ринку, середніх технічних характеристик, та загальної кількості пристроїв. Проте через відсутність детальних і перевірених даних про використання та технічні параметри ЕНВ, отримані результати можуть відхилятися від фактичних значень.

Розподіл ЕНВ та їх ресурсу залежно від об'єму і потужності

Об'єм, л	Потужність, кВт	Кількість, тис. шт	Ресурс, МВт
80	$\leq 1,5$	255,95	358
	1,6...2	618,36	1113
	$\geq 2,1$	151,75	368
100	$\leq 1,5$	167,61	234
	1,6...2	480,19	864
	$\geq 2,1$	113,25	249
Всього		1 787,11	3186

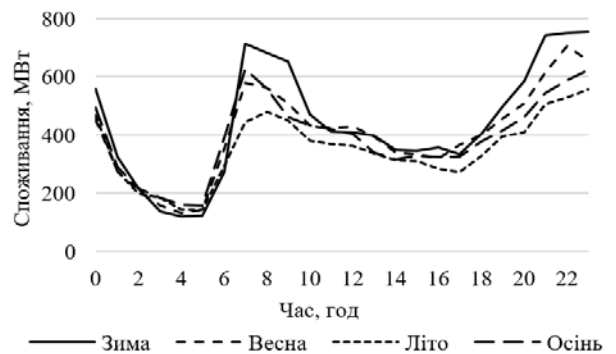


Рис. 4. Оціночний агрегований графік роботи ЕНВ з табл. 1 по сезонах

Агрегований графік роботи ЕНВ розраховано на основі річних історичних даних понад 25 різних споживачів, які, на відміну від дослідного ЕНВ, не обов'язково дотримувалися рекомендацій щодо температурних уставок наведених у цій роботі. Дані усереднено по годинах робочих днів для кожного сезону. Це дозволяє оцінити загальні закономірності енергоспоживання та підготувати модель для прогнозування й управління в рамках програм реагування на попит. У разі агрегування згладжуються піки та провали окремих споживачів, у результаті чого загальний добовий профіль енергоспоживання набуває рівномірнішого характеру, компенсуючи індивідуальні коливання. Взимку споживання енергії є найвищим у всі години доби, особливо вранці та ввечері, навесні й восени — знижується, а влітку — сягає мінімальних значень, з меншим піковими навантаженнями.

Формула для визначення усередненого агрегованого графіка

$$P_{agg} = \sum_{i=1}^N R_{type} \cdot P_{hour_i}, \quad (5)$$

де $\sum_{i=1}^N R_{type}$ — кількість пристроїв кожного типу i ; P_{hour_i} — усереднене погодинне енергоспоживання пристроїв типу i .

Загальний ресурс ЕНВ обсягом 80...100 літрів у розмірі близько 3 ГВт демонструє значний потенціал для забезпечення гнучкості енергосистеми. Головною перевагою такого ресурсу є можли-

вість його агрегування — об'єднання значної кількості ЕНВ у агреговану групу. Це дозволяє централізовано керувати роботою пристроїв та оптимізувати графіки навантаження.

До того ж, цей ресурс реагування на попит є гнучким. ЕНВ здатні змінювати час роботи нагрівальних елементів без шкоди для основної функції забезпечення гарячої води. Такий підхід дає змогу розподіляти споживання електроенергії, уникати пікових навантажень та інтегрувати відновлювані джерела енергії. Інтеграція ЕНВ до інфраструктури агрегатора створює функціональні передумови для їхньої участі на балансуєчому ринку та ринку допоміжних послуг. Така інтеграція підвищує гнучкість та адаптивність енергосистеми, сприяючи зростанню її надійності та економічної ефективності в процесах оперативного балансування. Агрегатор надає оператору системи передачі доступ до керованих децентралізованих ресурсів, що забезпечує можливість швидкого реагування на короткострокові коливання попиту та пропозиції в енергосистемі.

Висновки

У дослідженні оцінено потенціал ЕНВ як ресурсу для реагування на попит в енергосистемі. Аналіз варіативності споживання, сезонних коливань температури води у баку та відсутність єдиної методології збору даних показав складнощі у визначенні типового графіка споживання гарячої води. Для подолання цих труднощів застосовано моделювання та побудовано криві оптимальності за Парето значень температури та об'єму води. Це дозволило сформулювати точні рекомендації щодо оптимальних параметрів температури та об'єму води для забезпечення комфорту і енергоефективності в рамках програм реагування на попит, що базуються на результатах моделювання та аналізу даних.

Змодельовано вплив об'єму та температури нагріву води на ефективність роботи ЕНВ і комфорт споживачів. Запропоновано метод визначення координат межі кривої Парето, що дозволяє підтримувати баланс між комфортом споживачів та мінімальними витратами електроенергії. Оцінка ресурсу ЕНВ для реагування на попит в Україні показала, що агрегована робота водонагрівачів об'ємом 80...100 літрів може забезпечити ресурс для реагування на попит на рівні близько 3 ГВт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, «Правила ринку», *Постанова № 307* від 14.03.2018 р., у редакції № 2060 від 06.12.2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18/>. Дата звернення: 10.01.2025.
- [2] V. Kiianchuk, and K. Makhotilo, "Modeling of Domestic Electric Water Heaters for Demand Response," in *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology*, Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878015>.
- [3] Ariston, "What is the ideal temperature for domestic hot water?" [Electronic resource]. Available: <https://www.ariston.com/en-me/the-comfort-way/news/what-is-the-ideal-temperature-for-domestic-hot-water/>. Accessed 05.01.2025.
- [4] N. Beeker, P. Malisani, and N. Petit, "Dynamical modeling for electric hot water tanks," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 11, pp. 78-85, 2015.
- [5] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1111: *Thermostatic mixing valves. General technical specification*. Berlin, Germany: Beuth Verlag, 2017.
- [6] В. М. Кіянчук, і К. В. Махотіло, «Робоча група WG № C5.1UA: Потенціал впровадження заходів управління попитом для ОЕС України,» *ГС СИПРЕ-Україна*, с. 41-48, 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cigre.org.ua/nova-tehnichna-broshura-unk-robochoyi-gru/>. Дата звернення: 10.01.2025.
- [7] Державна служба статистики України, «Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України 2021». Київ, Україна: Державна служба статистики України, 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/07/zb_cdhd_21.pdf. Дата звернення: 10.01.2025.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.01.2025

Кіянчук Владислав Михайлович — аспірант кафедри електричних станцій, e-mail: Vladyslav.Kiianchuk@ieee.khpi.edu.ua ;

Махотіло Костянтин Володимирович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, професор кафедри електричних станцій, e-mail: Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Assessment of Water Heater Resource Features for Demand Response in the Energy System

¹National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

The article explores the potential of electric storage water heaters (ESWH) as a resource for demand response in the energy system. The primary focus is on assessing the impact of various parameters and conditions of ESWHs on their efficiency, consumer comfort, and ability to participate in demand response programs. Historical data on electricity consumption, obtained from research based on observations of real experimental installations, is analyzed.

The influence of the ESWH tank volume, temperature settings, and operating modes on energy efficiency and consumer comfort is examined in detail. The analysis identifies optimal settings that ensure a balance between system energy efficiency and consumer convenience. Special attention is given to water heater management strategies that minimize consumer discomfort during use, particularly through Pareto-optimal combinations of volume and temperature.

The article also analyzes the impact of seasonal factors, ESWH volume selection parameters, and the settings and operating modes that determine the effectiveness of ESWHs in demand response programs.

Furthermore, the potential of ESWHs for demand response in Ukraine was assessed, taking into account the total number of water heaters, most of which are storage and vertical installation models. The study separately examines selected medium-volume water heaters, which are the most popular for household use and have high potential for flexible demand management. Based on calculations, the number of water heaters of different types and capacities was determined, allowing for the evaluation of their contribution to the overall demand response potential of the energy system.

The proposed approaches may be useful for further implementation of demand response programs aimed at enhancing energy efficiency and the reliability of the energy system while maintaining a high level of consumer comfort.

Keywords: demand response, water heater, energy efficiency, balancing, aggregator.

Kyianchuk Vladyslav M. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Stations, e-mail: Vladyslav.Kiianchuk@ieee.khpi.edu.ua ;

Makhotilo Kostiantyn V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Professor of the Chair of Electric Power Stations, e-mail: Kostiantyn.Makhotilo@khpi.edu.ua