

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/01>**Литвин В.І.**

Національний університет біоресурсів та природокористування України

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОБУТОВИХ ЄМНІСТНИХ ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ ТА ШЛЯХІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ РОБОТИ

Стаття присвячена аналізу роботи ємнісних електричних електронагрівачів, що є одними з найбільших споживачів електричної енергії в побутовому секторі. Відмова багатьох міст України від централізованого теплозабезпечення зробила такий тип гарячого водопостачання практично безальтернативним для житлових багатопверхових будинків.

Беручи до уваги загальну потужністю зазначених електроспоживачів, а також значний потенціал в частині акумулювання енергії, розробка алгоритмів керування такими установками, а також методик підбору їх ємності є дуже актуальною, особливо в умовах дефіциту потужності генеруючих установок. Також зазначені підходи можуть бути використані під час оцінювання та підбору сонячних електростанцій в багатопверхових будинках і їх використання для потреб гарячого водопостачання. Стаття описує результати аналізу споживання ємнісними електричними водонагрівачами, а також методи підбору ємності обладнання.

В ході дослідження була зібрана інформація по профілям споживання гарячої води в багатоквартирних житлових будинках, що дозволило проаналізувати попит на електричну енергію пов'язаний з використанням ємнісних електричних водонагрівачів. Для визначення фактичних потреб електричної енергії з розрахунку на одне домогосподарство були використані показники споживання теплової енергії для будинків з централізованим гарячим водопостачанням, що дозволило отримати узагальнені профілі споживання енергії на потреби гарячого водопостачання та визначити потенціал зниження піків споживання за рахунок керування навантаженням ємнісних електричних водонагрівачів.

Розраховані потреби в гарячому водопостачанні дозволяють моделювати режими споживання електричної енергії житловими будівлями на потреби гарячого водопостачання та в подальшому керувати попитом в межах як окремої будівлі так і електричних мереж районів та міст загалом. Це особливо важливо з огляду на роботу в дефіцитній енергосистемі, а також з огляду на вибір оптимальної конфігурації (потужності, ємності накопичувачів) будинкових сонячних електростанцій.

Також розкритий потенціал зниження навантаження енергосистеми в умовах використання комбінованого виробництва теплової та електричної енергії за рахунок відмови від електричного підігріву води та використання централізованого гарячого водопостачання в комбінації з відновлювальними джерелами енергії.

Ключові слова: керування попитом, балансування навантаження, гаряче водопостачання, ємнісні електронагрівачі, дефіцит потужності, відновлювальні джерела енергії, енергосистема, балансування.

Постановка завдання. Останніми роками відбувається суттєва зміна в системах енергопостачання спричинена широким використанням відновлювальних джерел енергії, зокрема сонячної електроенергії, що характеризується нерівномірністю графіку генерації. В умовах роботи української енергосистеми додатково накладаються обмеження, що викликані руйнуваннями енергетичної інфраструктури в наслідок військової

агресії Російської Федерації, а саме недостатня кількість генеруючих потужностей та обмежена пропускна спроможність систем передачі електроенергії.

При цьому аналіз роботи споживача електроенергії, що становить від 50 до 75% від загального споживання домогосподарства, а відповідно і керування їм стає пріоритетним завданням, яке може суттєво пом'якшити наслідки дефіциту

потужності, а також зменшити потребу в маневровій генерації на традиційному паливі.

Одним з найбільших споживачів електричної енергії в побутовому секторі є ємнісні електричні водонагрівачі, що з огляду на руйнування систем централізованого гарячого водопостачання та тарифну політику стали основним джерелом гарячої води в багатоквартирних будівлях. В той же час акумулююча здатність таких приладів дає можливість суттєво впливати на графіки споживання електричної енергії побутовими споживачами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням використання навантаження на побутове гаряче водопостачання для керування попитом присвячено значну кількість досліджень та публікацій [1, 2, 3, 5, 7].

Стратегія керування попитом на стороні споживача [13], як правило розглядалася без врахування можливостей генерації електричної енергії на рівні будівель та аналізу потенціалу щодо одночасного керування попитом та генерацією на рівні будівлі. З огляду на збільшення долі гарячого водопостачання в балансі споживання електричної енергії домогосподарством (через впровадження значної кількості енергоощадних споживачів, зокрема освітлення та побутових приладів), а також все ширше розповсюдження дахових сонячних електростанцій та теплових насосів постає задача щодо розробки ефективних моделей керування зазначеними споживачами, зокрема з огляду на потенціал акумулювання і балансування навантаження. При цьому постає питання не лише щодо керування вже встановленим обладнанням, а також вибору оптимальних характеристик (в першу чергу ємності водонагрівачів та потужності електронагрівальних пристроїв), що дозволить найбільш раціонально використовувати наявні джерела електричної енергії.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є оцінювання потенціалу балансування електричних мереж за рахунок ємнісних електричних водонагрівачів, що використовуються в житлових та громадських будівлях. З огляду на те, що потужність ємнісних водонагрівачів наразі оцінюється лише для м. Києва в 300-400 МВт, що співрозмірно з блоком електростанції, а в межах України цей показник може становити близько 3 ГВт. При цьому, з огляду на погодинні графіки потреби в гарячому водопостачанні, спостерігається одночасна робота зазначених споживачів і залишається не використаним потенціал зміщення максимуму навантаження таких установок.

Відповідно гаряче водопостачання може розглядатися як дуже суттєвий споживач-регулятор в енергосистемі України. З огляду на значні руйнування генеруючих потужностей, а особливо маневрових, ефективне керування попитом дозволить пом'якшити наслідки дефіциту електроенергії, а після будівництва нових потужностей – забезпечити ефективне балансування відновлювальних джерел енергії та сприятиме досягненню цілей України щодо декарбонізації.

Вимірювання попиту на електричну енергію на потреби гарячого водопостачання в багатоквартирних житлових будівлях дозволить в подальшому підготувати пропозиції щодо оптимізації споживання та покриття зазначеного навантаження, вирівнювання графіків електроспоживання та інтеграції в будинкові системи електропостачання відновлювальних джерел енергії, зокрема будинкових сонячних електростанцій.

Виклад основного матеріалу. Методи. Найбільш складною задачею для визначення потенціалу використання ємнісних електронагрівачів в якості споживачів-регуляторів є оцінювання фактичної потреби домогосподарств в гарячому водопостачанні протягом доби і визначення фактичних витрат енергії на гаряче водопостачання серед загального енергоспоживання.

Використання нормативних витрат гарячої води, як правило не дає достовірних результатів як з огляду на зміни звичок споживачів та використання таких приладів як пральні та посудомийні машини, так і з огляду на відсутність достовірної інформації щодо кількості мешканців. Для проведення оцінювання фактичних потреб в енергії були використані статистичні дані по споживанню гарячої води багатоповерховими будівлями, де практично в повній мірі зберіглося централізоване гаряче водопостачання (рис. 1, 2).

Для оцінювання потреби в гарячому водопостачанні з використанням вузлів обліку теплової енергії і подальшого перерахунку в споживання електричної енергії для будівель, де централізоване гаряче водопостачання відсутнє були враховані наступні умови:

- споживання теплової енергії на гаряче водопостачання включає як витрати безпосередньо на підігрів холодної води так і втрати в трубопроводах, лінії циркуляції та в опалювальних приладах (рушникосушарках) підключених до системи гарячого водопостачання;

- виокремлення втрат в трубопроводах можливе за умови аналізу теплоспоживання в нічні години, коли розбір гарячої води є мінімальним

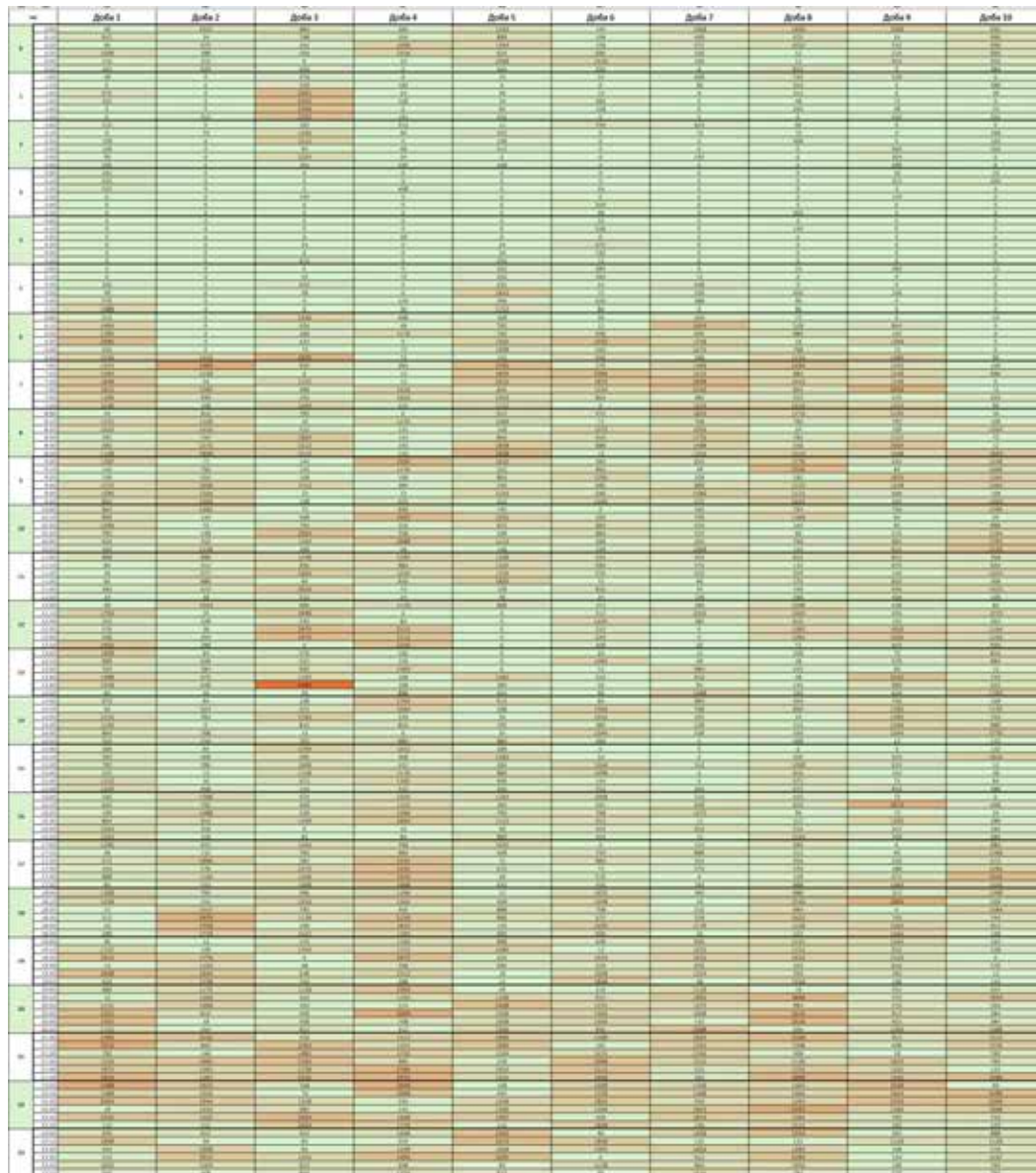


Рис. 1. Теплова карта розподілу споживання гарячої води протягом доби

а отже вся підведена енергія витрачається на покриття тепловтрат;

- контрольним параметром споживання гарячої води, що йде на підігрів може служити загальнобудинкове споживання холодної води з огляду на те, що пропорція споживання холодної та гарячої води, як правило, зберігається;

- для випадків, коли відсутній окремий облік споживання теплової енергії на гаряче водопостачання, лічильник теплової енергії обліковує загальне споживання на опалення та гаряче водопостачання, виокремити потребу енергії на гаряче водопостачання можливе в міжопалювальний період, коли відсутнє навантаження на опалення.

- у випадку, якщо для аналізу попиту на гаряче водопостачання використовується міжопалювальний період важливо зкоригувати споживання енергії на підігрів в зимових період з огляду на нижчу температуру холодної води, що йде на підігрів (5°C – в зимовий період та 15°C – в міжопалювальний період).

По результатам аналізу півгодинних інтервалів споживання гарячої води була побудована теплова карта (Рис. 1). Як видно, на рис. 1 попри загальну тенденцію щодо відповідності узагальненому графіку споживання гарячої води (Рис. 2) показники для різних діб можуть досить суттєво відрізнятися в частині початку та закінчення максимуму споживання води, а отже і моментів увімкнення/вимкнення електронагрівачів. Це обумовлюється як днем тижня і режимом використання так і іншими факторами, зокрема зовнішньою



Рис. 2. Усереднені дані споживання гарячої води протягом доби в багатоквартирному житловому будинку

температурою, що повинно бути проаналізовано додатково. Відповідно до цього має бути визначена оптимальна стратегія роботи водонагрівачів як для будинкових потреб так і в розрізі кожного домогосподарства.

В якості об'єкта дослідження був вибраний житловий 10 поверховий 6 під'їзний будинок, збудований за типовим проектом. Кількість квартир 240.

Аналіз узагальнених добових показників водопоспоживання вказує на середньодобовий показник в межах 65-80 л. на одну квартиру. Що в енергетичному еквіваленті становитиме 3.4-4.2 кВт-год (1):

$$E = 0,052 \times V, \quad (1)$$

де E – кількість енергії, необхідної на нагрів,
 V – об'єм використаної гарячої води, л.

За умови, що приготування гарячої води відбувалося б в електричних ємнісних електронагрівачах, їх встановлена потужність склала б 480 кВт, а добова потреба в електричній енергії – 912 кВт-год.

Відповідно повне зарядження електричних бойлерів могло б здійснюватися протягом приблизно 2 годин. Що дозволило б заповнити провал в графіку електроспоживання, який ми спостерігаємо в період з 0:30 до 5:00, або використати

потенціал сонячної генерації в денні години. Масштабування зазначених рішень на великі міста або країну дозволило б достатньо гнучко керувати попитом на електроенергію.

Зазначений підхід може також бути застосований під час аналізу потенціалу використання сонячної енергії на дахах багатоквартирних житлових будинків. Маючи інформацію про потенціальний обсяг енергоспоживання, а також потенціал генерації сонячними електростанціями є можливість проводити оцінювання оптимальної потужності енергоспоживання для використання в локальних системах електрозабезпечення.

Попередній аналіз такого потенціалу (з врахуванням потенціалу розміщення сонячних панелей на дахах будівель та їх помісячної генерації (рис. 3) наведено в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1 ємнісні водонагрівачі можуть розглядатися як основний акумулятор електричної енергії в будівлях без централізованого гарячого водопостачання. При цьому сонячні електростанції можуть покривати значний відсоток потреб в електроенергії в літній період, а з врахуванням застосування теплових насосів з коефіцієнтом перетворення 2,5 та вище повністю забезпечити гаряче водопостачання з березня по жовтень в 5 поверхівках та з квітня по вересень – в 9 поверхових житлових будинках.

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Рік
Генерація, кВт-год	317	528	870	1190	1416	1436	1427	1263	931	627	286	234	10 525

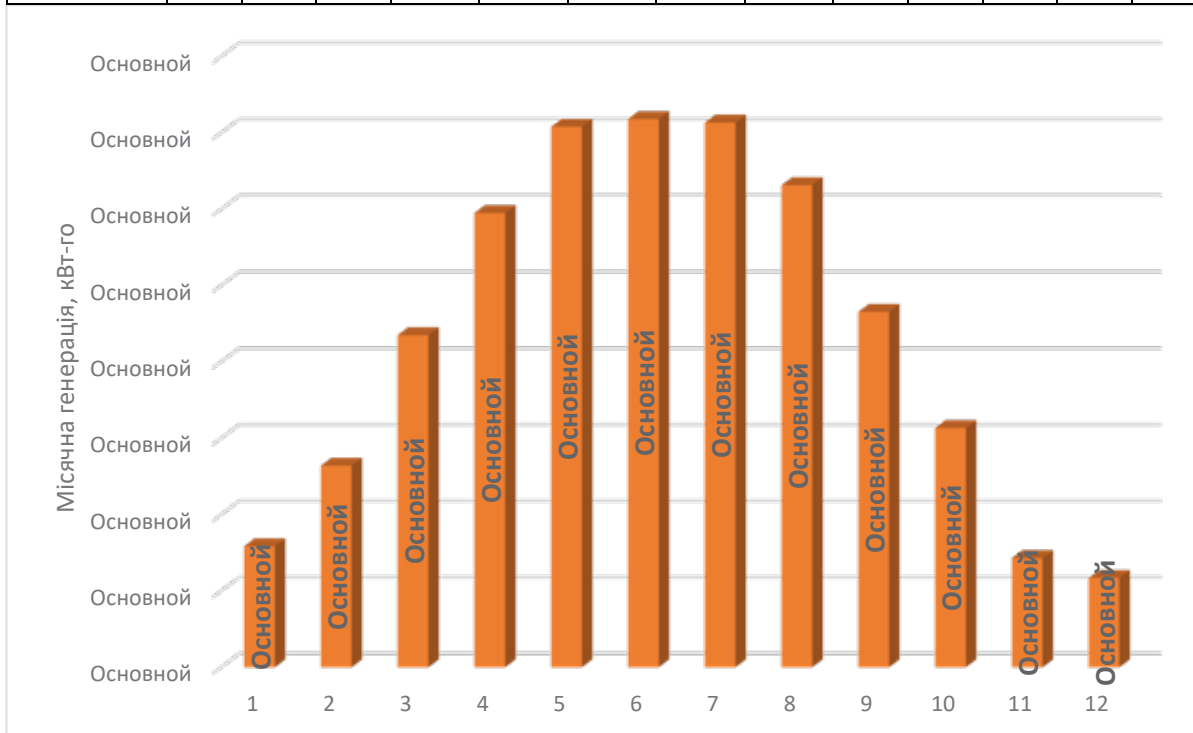


Рис. 3. Дані щодо генерації сонячною електростанцією потужністю 10 кВт протягом року

Таблиця 1

Потенціал покриття потреб житлових будинків сонячними системами

Місяць	5 поверхівки		9 поверхівки		16 поверхівки	
	Газова плита, без бойлера	Газова плита + бойлер	Газова плита, без бойлера	Газова плита + бойлер	Електроплита без бойлера	Електроплита + бойлер
Січень	53%	21%	29%	12%	6%	4%
Лютий	88%	35%	49%	20%	9%	6%
Березень	145%	58%	81%	32%	15%	10%
Квітень	198%	79%	110%	44%	21%	14%
Травень	236%	94%	131%	52%	25%	16%
Червень	239%	96%	133%	53%	25%	17%
Липень	238%	95%	132%	53%	25%	17%
Серпень	211%	84%	117%	47%	22%	15%
Вересень	155%	62%	86%	34%	16%	11%
Жовтень	105%	42%	58%	23%	11%	7%
Листопад	48%	19%	26%	11%	5%	3%
Грудень	39%	16%	22%	9%	4%	3%

При цьому будинки в 16 та вище поверхів, що як правило негазифіковані, маючи незначний потенціал покриття електроспоживання за рахунок локальних сонячних установок в той же час мають найбільшу потреби в керуванні попитом на електричну енергію.

Результати. В ході дослідження була зібрана інформація по профілям споживання гарячої води в багатоквартирних житлових будинках, що дозволило проаналізувати попит на електричну енергію пов'язаний з використанням електричних водонагрівачів.

Розраховані потреби в гарячому водопостачанні дозволяють моделювати режими споживання електричної енергії житловими будівлями на потреби гарячого водопостачання та в подальшому керувати попитом в межах як окремої будівлі так і електричних мереж районів та міст загалом. Це особливо важливо з огляду на роботу в дефіцитній енергосистемі, а також з огляду на вибір оптимальної конфігурації (потужності, ємності накопичувачів) будинкових сонячних електростанцій.

Проаналізований потенціал зниження енергоспоживання та навантаження за рахунок заміщення гарячого водопостачання централізованими системами, а також потенціал щодо зниження електричного навантаження багатоквартирних будинків за рахунок використання акумулюючих ємностей водонагрівачів, що наразі співрозмірно з будівництвом декількох нових енергоблоків маневрової генерації.

Висновки.

1. Системи гарячого водопостачання на базі ємнісних водонагрівачів є одними з найбільш перспективних для України з огляду на потенціал керування попитом на електричну енергію.

2. Аналіз показників теплоспоживання для будівель, де збереглося централізоване спожи-

вання гарячої води дозволяє визначити фактичну потребу в енергії на підігрів холодної води, а отже ідентифікувати потужність та споживання електроенергії житловими будівлями на потреби гарячого водопостачання.

3. Реалізація потенціалу акумулювання ємнісних електричних водонагрівачів дозволить в межах країни суттєво знизити дефіцит електричної потужності в години максимуму енергоспоживання. Окрім цього при проєктуванні систем розподіленої генерації це дозволить зменшити потужності розподільчих мереж, а з врахуванням впровадження систем комбінованого виробництва електричної та теплової енергії – в ряді випадків відмовитися від використання електронагрівачів на користь централізованого гарячого водопостачання.

4. З огляду на індивідуальні особливості споживання гарячої води як для окремих споживачів так і для будівель загалом важливим є побудова коректних моделей для прогнозування попиту на гаряче водопостачання, а також систем керування ємнісними водонагрівачами, що дозволили б не погіршуючи комфорту кінцевих споживачів максимально адаптуватися до потреб системи електропостачання та можливості максимального використання відновлювальних джерел енергії.

Список літератури:

1. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів: Ю.А. Веремійчук, В.П. Опришко, І.В. Притискач, О.С. Ярмолук.
2. Горский В. Особливості споживання електроенергії населенням – Science in the context of modern challenges: problems and development priorities
3. Агеєва Т. П. Методичні основи оцінки енергозбереження та прогнозування енергоспоживання в сфері житлового та комунально-побутового обслуговування населення України : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Ін-т заг. енергетики НАН України. Київ, 2002. 20 с.
4. Гребченко М. Системи електропостачання з локальними джерелами енергії та керування ними. Київ : Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського» проспект Берест., 37, м. Київ, 03056, 2023. 78 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/41e81896-4f4e-4106-96d7-711fa381e244/content>
5. КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ. Концепція Впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-p#Text>.
6. Карталапов К. М. Розподілена генерація та smart grid. <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.16.23.html>.
7. Кіянчук В. М., Махотіло К. В. Участь побутових споживачів на енергетичних ринках через керування попитом. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/c84e34e8-9332-464d-8290-08663c229d04>.
8. Панасюк М., Замулко А. І. Особливості проведення аналізу нерівномірності споживання електроенергії. <https://en.iee.kpi.ua/files/2012/153-165.pdf>.
9. A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710220310627>
10. Ackermann T., Andersson G., Söder L. Electric Power Systems Research. 3rd ed. Sweden : Department of Electric Power Engineering, Royal Institute of Technology, Electric Power Systems, Teknikringen 33, 10044 Stockholm, 2001. Vol. 57 : Distributed generation: a definition. 194-204 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779601001018>.

11. A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction / M. S. Bakare et al. URL: <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-023-00262-7>.
12. Palensky P., Dietrich D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. URL: https://www.researchgate.net/publication/224243498_Demand_Side_Management_Demand_Response_Intelligent_Energy_Systems_and_Smart_Loads
13. Williams B., Bishop D., Gallardo P. Demand Side Management in Industrial, Commercial, and Residential Sectors: A Review of Constraints and Considerations. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/13/5155>.
14. Farhangi H., Joos G. Microgrid Planning and Design: A Concise Guide. 2019. 256 p. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/book/8671408>.

Lytvyn V.I. WAYS TO OPTIMIZE THE ENERGY CONSUMPTION OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS IN THE PRESENCE OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES

The article is devoted to the analysis of capacitive electric water heaters, which are one of the largest consumers of electricity in the domestic sector. The refusal of many Ukrainian cities from district heating has made this type of hot water supply practically unavailable for residential multi-storey buildings.

Taking into account the total capacity of these electricity consumers, as well as their significant potential for energy storage, the development of algorithms for controlling such installations, as well as methods for selecting their capacity, is very relevant, especially in the context of a shortage of generating capacity. These approaches can also be used in the assessment and selection of solar power plants in multi-storey buildings and their use for hot water supply. The article describes the results of the analysis of consumption by capacitive electric water heaters, as well as methods for selecting the capacity of the equipment.

The study collected information on hot water consumption profiles in multi-apartment residential buildings, which allowed us to analyse the demand for electricity associated with the use of capacitive electric water heaters. To determine the actual electricity consumption per household, we used the heat energy consumption figures for buildings with centralised hot water supply, which allowed us to obtain generalised profiles of energy consumption for hot water supply and determine the potential for reducing consumption peaks by controlling the load of capacitive electric water heaters.

The calculated hot water demand allows modelling the modes of electricity consumption by residential buildings for hot water supply and subsequently managing demand within a single building and the electricity networks of districts and cities in general. This is especially important in view of the operation in a deficit power system, as well as the choice of the optimal configuration (power, storage capacity) of residential solar power plants.

The paper also reveals the potential for reducing the load of the power system in the context of combined heat and power generation by eliminating electric water heating and using centralised hot water supply in combination with renewable energy sources.

Key words: demand management, load balancing, domestic hot water supply, capacitive electric water heaters, power deficit, renewable energy sources, power system, balancing.