

Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, С. О. ФЕДОРЧУК, А. В. ІВАХНОВ, О. В. КУЛАПІН, В. В. ГРИЦЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ СОЦІО-ДЕМОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПОТЕНЦІАЛУ КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ

На сьогоднішній день найбільш розвинені країни стрімко збільшують обсяги виробництва електричної енергії на основі відновлюваних джерел енергії, що в першу чергу включає в себе збільшення частки генерації на сонячних та вітрових електричних станціях. Збільшення частки їх генерації призводить до виникнення проблем з підтримкою балансу генерації та навантаження. Причиною цього є стохастичний характер генерації сонячних та вітрових електричних станцій. Існує значна кількість можливостей для компенсації цієї проблеми: підтримка балансу за рахунок існуючих традиційних електричних станцій з високою швидкістю зміни потужності, встановлення накопичувачів енергії в місцях генерації, відключення частини потужності генерації на відновлюваних джерелах енергії, продаж або купівля енергії в сусідніх країнах, використання керування попитом. Ця стаття присвячена керуванню попитом, а саме використанню концепції просьюмерів з цією метою. Просьюмери, як учасники процесів в електроенергетичних системах, здатні функціонувати і в сучасних традиційних електричних системах за умови отримання додаткових можливостей по здійсненню ринкових операцій, однак переваги Smart Grid в значній мірі підвищують їх ефективність. Був розглянутий потенціал задіяння просьюмерів з метою вирівнювання графіків навантаження та підтримки балансу активної потужності в енергосистемі. Задля цього було розглянуто методи та інструментарій для аналізу режимів роботи звичайних споживачів та просьюмерів. Однак отримати реальні графіки споживання житлового району або навіть окремого будинку є складним завданням, що потребує значної кількості погоджень та одночасно дає інформацію тільки про окремі об'єкти. Саме тому аналіз режимів роботи просьюмерів базується на дослідженні графіків навантаження звичайних споживачів на основі програмного забезпечення для генерації графіків навантаження з урахуванням соціально-демографічних характеристик домогосподарств та міжнародного досвіду в керуванні попитом.

Ключові слова: smart grid, просьюмер, графіки навантаження, накопичувачі енергії, соціо-демографічний аналіз, вирівнювання графіків навантаження.

D. O. DANYLCHENKO, S. O. FEDORCHUK, A. V. IVAKHNOV, O. V. KULAPIN, V. V. HRYTSENKO

RESEARCH ON THE PROSPECTS OF APPLYING SOCIO-DEMOGRAPHIC DATA FOR THE ANALYSIS OF DEMAND MANAGEMENT POTENTIAL

Today, the most developed countries are rapidly increasing the volume of electricity generation based on renewable energy sources, which primarily includes an increase in the share of generation at solar and wind power plants. The increase in the share of their generation leads to problems with maintaining the balance of generation and load. The reason for this is the stochastic nature of the generation of solar and wind power plants. There are a significant number of possibilities to compensate for this problem: maintaining the balance at the expense of existing conventional power plants with a high rate of power change, installation of energy storage at generation sites, shutting down some generation capacity at renewable energy sources, selling or buying energy in neighbouring countries, and demand management. This article focuses on demand management, specifically on the use of the concept of prosumers for this purpose. As process participants in electric power systems, solicitors are also capable of functioning in today's conventional electric systems, provided they gain additional market operations capabilities, but the benefits of the Smart Grid greatly enhance their effectiveness. We considered the potential of attracting Smart Grid players to align load schedules and maintain the balance of active power in the power system. For this purpose, we considered methods and tools for analysing the modes of operation of conventional consumers and solenoid meters. However, to obtain real consumption schedules of a residential area or even an individual house is a difficult task, which requires a significant amount of coordination and at the same time provides information only about individual facilities. That is why the analysis of the modes of operation of requestors is based on the study of load schedules of ordinary consumers based on the software for generating load schedules, taking into account the socio-demographic characteristics of households and international experience in demand management.

Keywords: smart grid, prosumer, load schedules, energy storage, socio-demographic analysis, load schedule flattening.

Вступ. Сучасний розвиток електроенергетичних мереж з одного боку значно ускладнює процеси керування, а з іншого надає змогу використовувати все більше інструментів для підтримки балансу електричної енергії. Стаття присвячена дослідженню потенціалу використання просьюмерів з цією метою. Зазвичай для вирішення цієї задачі можливо використовувати вже накопичені дані з приладів обліку, однак на даний момент автори до таких даних доступу не мають, тому перший етап дослідження було вирішено провести на змодельованих даних. Для цього необхідно реалізувати наступні етапи [1]:

- визначення регіону для дослідження;
- проведення аналізу соціо-демографічного складу мешканців об'єкту, що досліджується;

- прогнозування графіків навантаження мешканців з урахуванням особливостей регіону та проведеного аналізу на попередньому етапі;

- розрахунок потенційних добових відхилень графіків навантаження від середнього значення;

- розрахунок необхідної кількості енергії для вирівнювання графіку навантаження з урахуванням додаткових технічних параметрів обраних накопичувачів енергії.

В якості регіону для дослідження було обрано багатоквартирний будинок у місті Харків. В рамках дослідження прийнято припущення, що розподіл сімей в будинку та їх рівень життя повністю відповідає соціо-демографічним даних по Харкову та області.

Мета статті. Дослідити можливість вирівнювання графіку побутового навантаження

базуючись на поведінковому моделюванні споживачів з урахуванням соціо-демографічних даних.

Аналіз графіків споживання. Керування попитом є важливим інструментом підвищення гнучкості внутрішнього енергетичного ринку та забезпечення ефективного і раціонального використання обладнання електроенергетичної мережі. Вплинути на характер споживання електроенергії можливо за рахунок дво-, три- або більше зонних тарифів. Зміни в графіках навантаження відбуваються наступним чином [2–4]:

- по-перше, споживач може зменшити використання електричних пристроїв у часи критичних пікових навантажень добових графіків, коли ціни високі, це передбачає тимчасову втрату комфорту. Зазвичай це реалізується за рахунок налаштування таймера та термостата обігрівачів або кондиціонерів;
- по-друге, споживач може переносити використання приладів, що не впливають на комфорт, в інший час, більш дешевої електроенергії;
- по-третє, споживачу належать певні об'єкти енергосистеми, наприклад, системи накопичення енергії. Споживачі можуть не відчувати зовсім або відчувати дуже незначні зміни в їх звичному графіку використання електроенергії.

Однак використання такої системи не завжди є ефективним рішенням для споживачів, що мають намір більш активно приймати участь у процесі підтримання балансу потужності в енергосистемі. Такі споживачі найчастіше мають власні відновлювані електричні станції невеликої потужності, а також встановлені накопичувачі енергії. Їх можливо розглядати в якості прос'юмерів.

Розглянемо прос'юмерів в якості елемента електроенергетичної системи та методи дослідження потенціалу їх задіяння в задачах підтримки балансу потужності або вирівнювання графіків навантаження. Прос'юмер є відносно новим терміном, що поєднує в собі «виробника» та «споживача». Прос'юмер відрізняється від традиційного споживача тим, що не тільки споживає електричну енергію, а й має можливість до її накопичення або генерації. Існує декілька варіантів використання надлишків енергії прос'юмерами, а саме продаж її в енергосистему та адресний продаж окремим споживачам. Вигода енергосистеми від задіяння прос'юмерів полягає в покращенні ефективності роботи енергомережі, підтриманні балансу місцевого попиту і пропозиції на енергоресурси, зменшенні навантаження на розподільчі мережі за рахунок локальних змін в навантаженні та роботі накопичувачів енергії. Наявність системи керування на основі двосторонніх зв'язків, інтелектуальних вимірювальних приладів, засобів дистанційного контролю – це одні з ключових умов для використання концепції прос'юмерів. Інтеграція прос'юмерів до електроенергетичної мережі надає наступні переваги:

- можливість підтримки балансу споживання електричної енергії, що покращує якості електричної

енергії та підвищує стабільність роботи на локальному рівні;

- можливе зниження вартості електричної енергії для побутових споживачів, шляхом їх залучення до прямої або опосередкованої участі на ринку електричної енергії;
- зниження навантаження на розподільчі мережі середньої та низької напруги, що дозволяє не допустити їх перевантаженості та зменшити втрати на передачу енергії;
- зменшення викидів шкідливих речовин від традиційних електричних станцій за рахунок використання прос'юмерами відновлюваних джерел енергії.

В якості учасника керування попитом можуть виступати споживачі, які підключені на рівні напруги 1000 В або нижче. До цього діапазону входить велика кількість об'єктів побутового сектору, що потенційно можуть бути залучені до категорії прос'юмерів. Використання такого типу прос'юмерів для вирішення задач підтримки заданих параметрів в електричних мережах має певні обмеження. Першим обмеженням виступає низька ефективність при задіянні окремих поодиноких споживачів. Це обмеження обумовлено значною питомою вартістю обладнання та низьким потенціалом для зміни рівня потужності. Друге обмеження базується на значній складності аналізу та керування значної кількості прос'юмерів. В роботі було прийнято рішення провести аналіз потенціалу використання в якості прос'юмерів багатопверхового будинку зі спільним для всіх квартир накопичувачем енергії. Для цього було проведено аналіз соціально-демографічних показників району міста Харків. Також було враховано економічний рівень осіб, що могли б проживати в такому будинку.

Соціально-демографічний та економічний аналіз. Для формування графіків навантаження необхідно враховувати значну кількість інформації. Побутове навантаження характеризується набагато більшою різноманітністю факторів впливу і внутрішніх особливостей на відміну від промисловості, сільського господарства і комунальних закладів. Крім погодних умов, складу сімей споживачів, характеристик житла і використовуваних електроприладів, на рівень споживання енергії рішуче впливає поведінка людини.

Було обрано багатоквартирний будинок в місті Харків в якості об'єкту дослідження. Клас будинку обрано «бізнес», оскільки прос'юмери відносяться до категорії забезпечених громадян. Цьому будинку відповідають параметри з табл. 1 [5–7]. Кількість проживаючих в будинку сімей визначаємо як 100, відповідно до наведених параметрів.

Для обраних 100 сімей важливо визначити склад та врахувати кількість працюючих членів сім'ї. Такий аналіз необхідний для аналізу поведінки та встановлення розкладу наших прос'юмерів. Дані державної служби статистики України показують, що 52,5 % домогосподарств знаходяться у великих містах та середній розмір сім'ї складає 2,42 особи [8–10]. В

табл. 2 розміщено соціально-демографічні характеристики домогосподарств України у 2020 році.

Таблиця 1 – Параметри будинку для класу будинку категорії «бізнес»

Назва параметру	Характеристика
Технологія будівництва	монолітно-каркасна, цегляна кладка
Основний будівельний матеріал	цегла силікатна керамічна
кількість квартир в будинку	більше 100
кількість квартир на поверсі	до 8
мінімальна площа на 1 мешканця	більше 40 м ²

Таблиця 2 – Соціально демографічні характеристики домогосподарств України у 2020 році

Склад сім'ї	Частка домогосподарств
Одна особа	21,2 %
Дві особи	35,3 %
Три особи	27,7 %
Чотири та більше осіб	15,8 %
Сім'ї з дітьми до 18 років	33,9 %

На основі наведених даних склад сімей в будинку виглядає наступним чином:

- 21 сім'я складається з однієї особи,
- 35 – з двох,
- 28 – з трьох,
- 16 – з чотирьох.

Всі сім'ї з трьох та чотирьох осіб мають дітей різного віку. Наступний етап дослідження – отримання графіків навантаження.

Графіки навантаження. Існуючі методи моделювання навантаження побутових споживачів передбачають використання історичної інформації або даних про встановлене обладнання. Рівень енергоспоживання можливо аналітично оцінити або спрогнозувати на основі цих даних. Існуючі для цього методи мають різні сильні, слабкі сторони, а також вимоги для застосування, але всі вони вимагають великої кількості точних і детальних даних про споживача. Методи моделювання побутового енергоспоживання можливо розділити на дві категорії, умовно позначені: «згори вниз» і «знизу вгору». Перший метод передбачає першочергове дослідження

енергоспоживання регіону з наступним переходом до окремих споживачів за допомогою додаткових параметрів. Типові графіки навантаження – один з основних прикладів застосування цього методу. Другий метод екстраполює графіки окремих споживачів на рівень країни. Цей метод потребує значно більшої кількості інформації, однак дає збільшення точності розрахунків.

Для аналізу було використано другий метод. В якості програмного забезпечення було обрано «Генератор електричного навантаження LPG». Цей метод завдяки обраному програмному забезпеченню дозволяє отримати графік навантаження базуючись на складі сім'ї, наявних електроприладах та поведінки кожного з членів домогосподарства. Кожна особа отримує налаштування із завданнями та термінами їх виконання. Наприклад приготування їжі має відбуватись двічі та займати сумарно 1,4 години на добу. Для кожного з чотирьох типів сімей було згенеровано графіки навантаження за допомогою LPG. При цьому багаторазова генерація надає кожен раз новий вигляд графіку навантаження, однак зберігає характерні особливості. Для проведення дослідження було згенеровано кількість графіків відповідно до кількості сімей та проведено їх обробку. Це дозволило сформулювати типові графіки для кожного типу сім'ї та кожного сезону. Графіки для зимового сезону кожної сім'ї представлені на рис. 1.

Приклади графіків навантаження для споживачів однієї категорії, а саме квартир з одним працюючим споживачем, але різних сезонів наведено на рис. 2.

З наведених на рисунку 2 графіків видно, що піки споживання електричної енергії співпадають за часом, однак можуть суттєво відрізнятися за формою. Результати повного дослідження відображено в табл.3. Слід зазначити, що більший рівень споживання в квартирах на три особи обумовлений наявними електроприладами та поведінковими особливостями.

Таблиця 3 – Кількість енергії необхідна для вирівнювання добових графіків навантаження, кВт·год

Об'єкт	Зима	Весна	Літо	Осінь	Весь рік
Одна особа	45.6	29.12	22.5	26.1	45.6
Дві особи	43.9	38.6	48	32.7	43.9
Три особи	54.2	59.3	55.1	56.6	56.6
Чотири та більше осіб	42.8	51.5	46.5	50.71	51.5
Будинок	5191	4861	4353	4515	5191

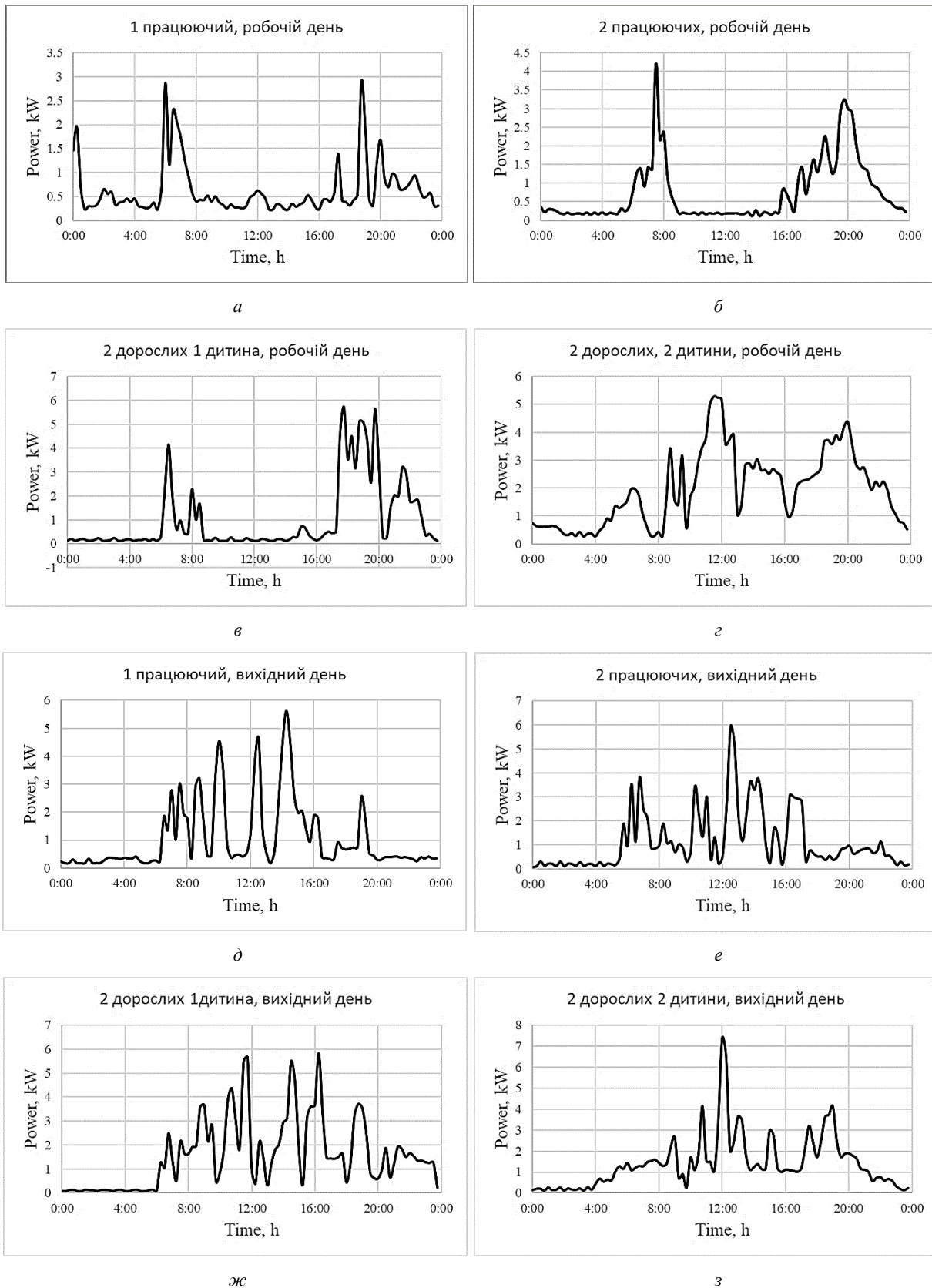
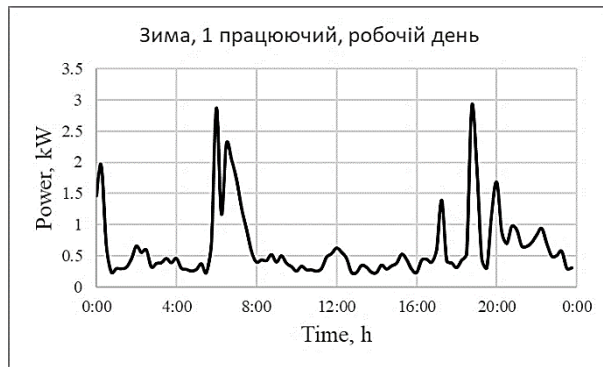
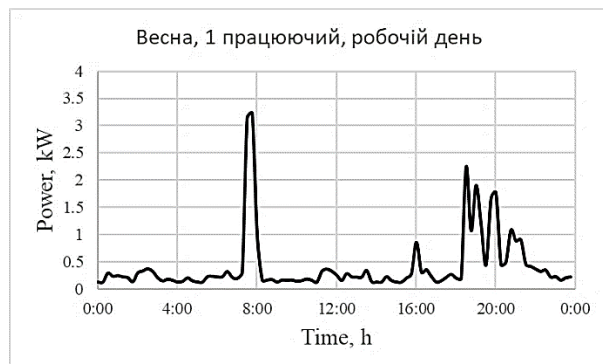


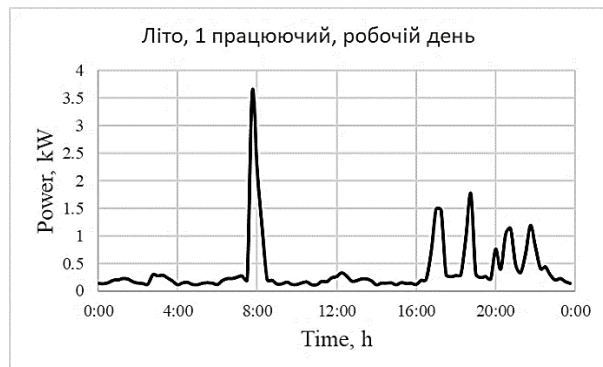
Рисунок 1 – Графіки навантаження типових споживачів



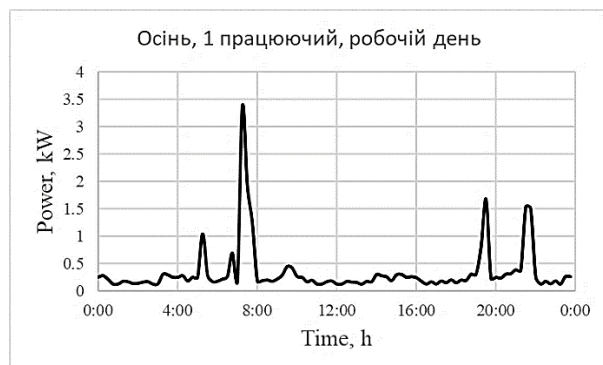
а



б



в



г

Рисунок 2 – Графіки навантаження сім'ї з однієї працюючої людини за 4 сезони

На основі отриманих річних даних визначено, що для вирівнювання графіку навантаження цілого

будинку необхідна кількість енергії складає 5191 кВт·год. Однак глибина розряду дуже впливає на тривалість використання систем накопичення. Для літій-іонних накопичувачів рекомендується використовувати розряд не більше ніж до 20 %. Таким чином 5191 кВт·год складає 80 % від необхідного заряду. Враховуючи це об'єм слід збільшити до 6490 кВт·год. Додаткове врахування мінімального коефіцієнту ефективності заряду-розряду 80 % збільшує необхідний об'єм накопичувача до 8113 кВт·год. Розрахунок проводиться за формулою (1):

$$C = \frac{W_{\text{макс}}}{h_{\text{зр}} C_{\text{макс}}}, \quad (1)$$

де $W_{\text{макс}}$ – максимальна кількість енергії, що необхідна для вирівнювання добового графіку навантаження будинку;

$h_{\text{зр}}$ – ефективність заряду-розряду накопичувачів енергії;

$C_{\text{макс}}$ – максимальна глибина розряду.

Слід зазначити, що реальні необхідні параметри накопичувача будуть відрізнятися від отриманих за рахунок розбіжності піків навантаження. Однак більш точний розрахунок потребує значної кількості додаткової інформації та тривалого накопичення даних. Встановлення такого накопичувача дозволить повністю вирівняти графік навантаження та додатково розвантажити мережі електропостачання. Завдяки проведеному аналізу можливо також дізнатися необхідну ємність накопичувачів для кожного окремого споживача. Це рішення менш ефективне, ніж підключення цілого будинку оскільки питомі витрати збільшуються при зменшенні потужності. Накопичувач енергії з розрахованим об'ємом можливо не лише використовувати для вирівнювання графіку навантаження, а також додатково надавати послуги для ринку електричної енергії додаткових послуг. Це можливо оскільки накопичувач було обрано за піковими показниками. У цьому сценарії жителі будинку стають активними споживачами.

Висновки. У статті було проведено аналіз графіків навантаження багатоквартирного будинку на основі моделювання з урахуванням рівня життя та поведінкових особливостей мешканців. Отримані в дослідженні дані дозволяють визначити необхідні параметри накопичувача енергії для вирівнювання графіків навантаження та виконання функції прос'юмера. Подальшими кроками в дослідженні будуть виступати аналіз реальних даних та оцінка економічної ефективності використання спільного для всього будинку накопичувача енергії.

Список літератури

1. Li F. G. N., Bataille C., Pye S., O'Sullivan A. Prospects for energy economy modelling with big data: Hype, eliminating blind spots, or revolutionising the state of the art? *Applied Energy*. 2019. Vol. 239. P. 991–1002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.002>.
2. Пантелеев П. О. Типізація, класифікація та техніко-економічні характеристики багатоквартирних будинків. *Економіка та держава*. 2014. № 5. С. 88–92.

3. Filatova T., Verburg P. H., Parker D. C., Stannard C. A. Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental Modelling & Software*. 2013. Vol. 45. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.017>.
4. Mrówczyńska M., Skiba M., Bazan-Krzywoszańska A., Sztubecka M. Household standards and socio-economic aspects as a factor determining energy consumption in the city. *Applied Energy*. 2020. Vol. 264. P. 114680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114680>.
5. Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України у 2020 році : Стат. зб. Київ : Держ. служба статистики України, 2020. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2020/zb/07/zb_cdhhd_20.pdf.
6. Chévez P. J., Martini I., Discoli C. Methodology developed for the construction of an urban-energy diagnosis aimed to assess alternative scenarios: An intra-urban approach to foster cities' sustainability. *Applied Energy*. 2019. Vol. 237. P. 751–778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.037>.
7. Mrówczyńska M., Alsabry A., Skiba M., Bazan-Krzywoszańska A. Research on energy consumption in the city. A system of modelling potential for energy effectiveness using artificial intelligence. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. 2014. Vol. 3, no. 5. P. 373–384.
8. Morales-España G., Martínez-Gordón R., Sijm J. Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*. 2022. Vol. 242. P. 122544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>.
9. Alhamwi A., Medjroubi W., Vogt T., Agert C. Development of a GIS-based platform for the allocation and optimisation of distributed storage in urban energy systems. *Applied Energy*. 2019. Vol. 251. P. 113360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113360>.
10. Haarstad H., Wathne M. W. Are smart city projects catalyzing urban energy sustainability?. *Energy Policy*. 2019. Vol. 129. P. 918–925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.001>.
2. P. Panteleev, "Typing, classification and technical and economic indicators tenement house," *Ekonomika ta derzhava*, no. 5, pp. 88–92, 2014.
3. T. Filatova, P. H. Verburg, D. C. Parker, and C. A. Stannard, "Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects," *Environmental Modelling & Software*, vol. 45, pp. 1–7, Jul. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.017>.
4. M. Mrówczyńska, M. Skiba, A. Bazan-Krzywoszańska, and M. Sztubecka, "Household standards and socio-economic aspects as a factor determining energy consumption in the city," *Applied Energy*, vol. 264, p. 114680, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114680>.
5. Social and Demographic Characteristics of Households of Ukraine. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine, 2020. Accessed: May 11, 2022. Available: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2020/zb/07/zb_cdhhd_20.pdf. (in Ukrainian)
6. P. J. Chévez, I. Martini, and C. Discoli, "Methodology developed for the construction of an urban-energy diagnosis aimed to assess alternative scenarios: An intra-urban approach to foster cities' sustainability," *Applied Energy*, vol. 237, pp. 751–778, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.037>.
7. M. Mrówczyńska, A. Alsabry, M. Skiba, and A. Bazan-Krzywoszańska, "Research on energy consumption in the city. A system of modelling potential for energy effectiveness using artificial intelligence," *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, vol. 3, no. 5, pp. 373–384, 2014.
8. G. Morales-España, R. Martínez-Gordón, and J. Sijm, "Classifying and modelling demand response in power systems," *Energy*, vol. 242, p. 122544, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>.
9. A. Alhamwi, W. Medjroubi, T. Vogt, and C. Agert, "Development of a GIS-based platform for the allocation and optimisation of distributed storage in urban energy systems," *Applied Energy*, vol. 251, p. 113360, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113360>.
10. H. Haarstad and M. W. Wathne, "Are smart city projects catalyzing urban energy sustainability?," *Energy Policy*, vol. 129, pp. 918–925, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.001>.
1. F. G. N. Li, C. Bataille, S. Pye, and A. O'Sullivan, "Prospects for energy economy modelling with big data: Hype, eliminating blind spots, or revolutionising the state of the art?," *Applied Energy*, vol. 239, pp. 991–1002, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.002>.

References

Надійшла (received) 26.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Данильченко Дмитро Олексійович (Danylchenko Dmytro Oleksiyovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khi.edu.ua.

Федорчук Станіслав Олегович (Fedorchuk Stanislav Olegovich) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних станцій; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7676-8313>; e-mail: stanislav.fedorchuk@khi.edu.ua.

Івахнов Андрій Віталійович (Ivakhnov Andrii) – асистент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8280-0033>; e-mail: andrii.ivakhnov@khi.edu.ua.

Кулапін Олександр Валентинович (Kulapin Oleksandr) – аспірант кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9283-6910>; e-mail: Oleksandr.Kulapin@ieee.khi.edu.ua.

Гриценко Владислав Віталійович (Hrytsenko Vladyslav) – аспірант кафедри електричних станцій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4499-0603>; e-mail: Vladyslav.Hrytsenko@ieee.khi.edu.ua.