

ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ НОМІНАЛЬНОЮ НАПРУГОЮ 20 кВ З ДЖЕРЕЛАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Отримано 15 квіт. 2023; рекомендовано до публікації 22 чер. 2023
Доступно онлайн 30 чер. 2023

М. С. Іськова¹, А. Р. Буряк², В. В. Кирик³

Автор для кореспонденції: Маргарита Іськова,
e-mail: moluskamargarita@gmail.com

У статті розглядається вирішення проблеми забезпечення надійного та ефективного електропостачання для споживачів з використанням джерел накопичення енергії. Відзначається, що зберігання енергії може допомогти підвищити загальну якість електропостачання, особливо при зростанні частки потужності альтернативних джерел енергії. Описано використання накопичувачів у мережах низької напруги, для отримання максимального прибутку домогосподарств від відновлюваних джерел енергії та накопичувальних станцій для балансування мережі та поліпшення її стійкості. Зазначена можливість компенсації коливань від відновлюваних джерел енергії шляхом видачі потужності в час піку та зарядки від мережі в момент мінімуму. Продемонстровані результати моделювання мережі номінальною напругою 20 кВ з узагальненим джерелом відновлюваної енергії у вигляді сонячної електростанції та накопичувальною батареєю. Визначені переваги застосування цих джерел, як-от: керування енергією, резервне живлення, вирівнювання навантаження, регулювання частоти, підтримка напруги та стабілізація мережі. Робота демонструє актуальність використання джерел накопичення енергії для забезпечення стійкого та ефективного електропостачання споживачам.

Ключові слова: мережі 20 кВ, відновлювані джерела енергії, мережі середньої напруги, накопичувачі енергії, напруга, енергія.

¹ студентка.

<https://orcid.org/0000-0003-4206-5630>;

² аспірантка.

<https://orcid.org/0000-0001-7732-575X>

³ д-р техн. наук.

<https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

^{1, 2, 3} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

20 kV NOMINAL VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS WITH ENERGY STORAGE SOURCES

Received 15 Apr. 2022; accepted 22 Jun. 2023
Available online 30 Jun. 2023

M. S. Iskova¹, A. R. Buriak², V. V. Kyryk³

Author for correspondence: Margarita Iskova,
e-mail: moluskamargarita@gmail.com

This article considers the solution to the problem of ensuring reliable and efficient electricity supply for consumers using sources of energy storage. It is noted that energy storage can help improve the overall quality of electricity supply, especially when the share of power from alternative energy sources increases. The use of accumulators in low-voltage networks is described in order to obtain the maximum profit of households from renewable energy sources and storage stations for balancing the network and improving its stability. The possibility of compensating fluctuations from renewable energy sources by releasing power at peak times and charging from the network at the time of minimum is indicated. The simulation results of a network with a nominal voltage of 20 kV with a generalized source of renewable energy in the form of a solar power plant and a storage battery are demonstrated. Benefits of using data sources such as energy management, backup power, load balancing, frequency regulation, voltage maintenance and grid stabilization have been identified. The work demonstrates the relevance of using sources of energy storage to ensure sustainable and efficient electricity supply to consumers.

¹ Student.

<https://orcid.org/0000-0003-4206-5630>

² Postgraduate.

<https://orcid.org/0000-0001-7732-575X>

³ Dr. Sc. (Eng.), Professor.

<https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

^{1, 2, 3} National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv.

Key words: 20 kV networks, renewable energy sources, medium voltage networks, energy storage, voltage, energy.

Перелік використаних позначень та скорочень

ННД – накопичувач електричної енергії

СНД – сонячна електростанція

ВНД – вітрова електростанція

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

Вступ. Збільшення потужності генерації відновлюваних джерел енергії в електричній системі, де виробництво та попит мають бути збалансовані в будь-який час, сприяло відновленню інтересу до технологій зберігання енергії. Постійна потреба в миттєвому балансі генерації є основним обмеженням в електроенергетичній системі, що впливає на всіх етапах від виробництва та постачання до передачі та розподілу [1]. Джерела накопичення енергії можуть забезпечити гнучкість системи. Електромережа України в перспективі повинна оптимально поєднати джерела генерації й накопичення електроенергії разом зі споживачем з формуванням на рівні операторів системи розподілу гнучкого процесу колективного розв'язання проблем стійкості енергосистеми та її інтеграції в європейський енергетичний ринок.

В Україні керування генерацією здійснюється за командами диспетчерської служби [2]. Очевидно, що таке керування не є ефективним як енергетично, так і економічно, тим паче в умовах воєнного часу. Під час модернізації енергосистеми слід виходити із сучасних особливостей і перспективних пріоритетів Об'єднаної енергосистеми України. У розподільних мережах, зокрема 6 (10) кВ, втрати електроенергії становлять 6...9 % (в окремих енерговузлах 25...33 %) [3]. Автоматизоване керування балансуванням потужності по місцю, що спирається на накопичувачі електричної енергії та переведення електричної мережі з 6 та 10 кВ на вищий клас номінальної напруги – 20 кВ, забезпечить надійну й ефективну передачу електричної енергії споживачу [4] без додаткової сплати за втрати в мережі.

Джерела накопичення енергії мають цілу низку позитивних застосувань, а саме: керування енергією, резервне живлення, вирівнювання навантаження, регулювання частоти, підтримка напруги та стабілізація мережі.

Технологія зберігання може допомогти підвищити загальну якість електропостачання; при зростанні частки потужності СНД та ВНД у мережі виникає потреба збільшення обертового резерву потужності. Одним з можливих рішень є ННД. Ця технологія здатна підвищити надійність та відмовостійкість електрорустаткування й електромережі в цілому шляхом регулювання змінної генерації та покращення функціональності розподільної мережі з підвищенням її рівня живучості.

Накопичувачі електричної енергії можуть використовуватися в мережах різного класу напруги залежно від мети їх застосування. В мережах низької напруги накопичувачі набули поширення разом із розвитком альтернативних джерел енергії. Вони використовуються для отримання

максимального прибутку домогосподарством від ВДЕ за рахунок зарядки під час оптимальних умов (сонячна / вітряна погода) та розряду в момент споживання [5]. Така стратегія використання ННД є оптимальною для споживача, але не для електричної мережі. З іншого боку, сьогодні розробляються проекти надвеликих накопичувальних станцій [6], головною метою яких є балансування мережі та поліпшення її стійкості.

Постановка завдання. Дослідження мережі з номінальною напругою 20 кВ та накопичувачем електричної енергії. Метою моделювання є ілюстрація оптимізації графіка навантаження та дослідження можливості перспективи застосування ННД в розподільних мережах. Для досягнення поставленої мети розглядаються два випадки:

- мережа 20 кВ з ННД та СНД;
- мережа 20 кВ з ННД.

Виклад основного матеріалу

Оптимізація кривої навантаження при використанні ННД. Використання ННД в мережах середньої напруги характеризується можливістю гнучкого налаштування: під час компенсації коливань видачі потужності від ВДЕ при збереженні можливості оптимізації кривої навантаження шляхом видачі потужності в час піку та зарядки від мережі в момент мінімуму – нічний час. Головною перевагою є можливість працювати в острівному режимі без відключення споживачів за умови наявності ВДЕ в певному сегменті мережі.

У моделюванні досліджувалась мережа номінальною напругою 20 кВ з узагальненим джерелом ВДЕ у вигляді СНД потужністю 0,15 МВт та накопичувальною батареєю ємністю 7500 кВт·год, навантаження змінюється відповідно до функції залежності, що наведена нижче. Велика ємність досліджуваної акумуляторної батареї вибрана з огляду на ефективність та довговічність її роботи в електричній мережі. Якщо накопичувач розряджати до 0 % і заряджати до 100 %, це зменшить термін його роботи, а отже, підвищить вартість капіталовкладень у майбутньому. Ідеальний діапазон заряду батареї становить 19–85 %. Використано добовий графік виробництва / споживання електроенергії за 6 квітня 2022 року. В роботі для оптимізації кривої навантаження при використанні накопичувачів електричної енергії застосовувався програмний комплекс *MatLab*. За попередньо розрахованим часом вмикається видача потужності акумуляторної батареї. Функція залежності добового графіка сонячного опромінення – формула 1.

$$F(x) = \begin{cases} 0, x < 5 \text{ or } x > 19 \\ a_1 \times \sin(b_1 \times x + c_1) + a_2 \times \sin(b_2 \times x + c_2) + a_3 \times \sin(b_3 \times x + c_3) \end{cases}, \quad (1)$$

де

$$a_1 = 539.3; b_1 = 0.1847; c_1 = -0.6163; a_2 = 172.7; b_2 = 0.5497; c_2 = 1.447; a_3 = 34.06; b_3 = 1.023; c_3 = -1.533.$$

Для моделювання фрагмента мережі з ВДЕ та НЕЕ прийняті залежності сонячної радіації та навантаження від моменту часу. Для визначення денної радіації використано дані з сайту [7]. Графіки залежності енергії опромінення від моменту часу показані на рис. 1.

Аналогічним чином за відомим графіком навантаження, показаним на рис. 2, визначено залежність споживання потужності від моменту часу.

Апроксимована крива розподілу навантаження мережі від часу рис. 3 використовується у в. о., а тому є приве-

деною до базисного навантаження – 6,5 МВт згідно з рис. 2.

Для зазначеної мережі максимальна потужність навантаження СЕС $P_{\text{СЕС}}$ становить 0,15 МВт і видається за графіком, показаним на рис. 4, споживання порядку 0,8...0,9 МВт, потужність накопичувача електричної енергії 0,05 МВт. За умови, що СЕС працює на повну потужність в безхмарну погоду, а також за умови увімкнення НЕЕ на час $6 < t < 17$ із підзарядкою в решту часу.

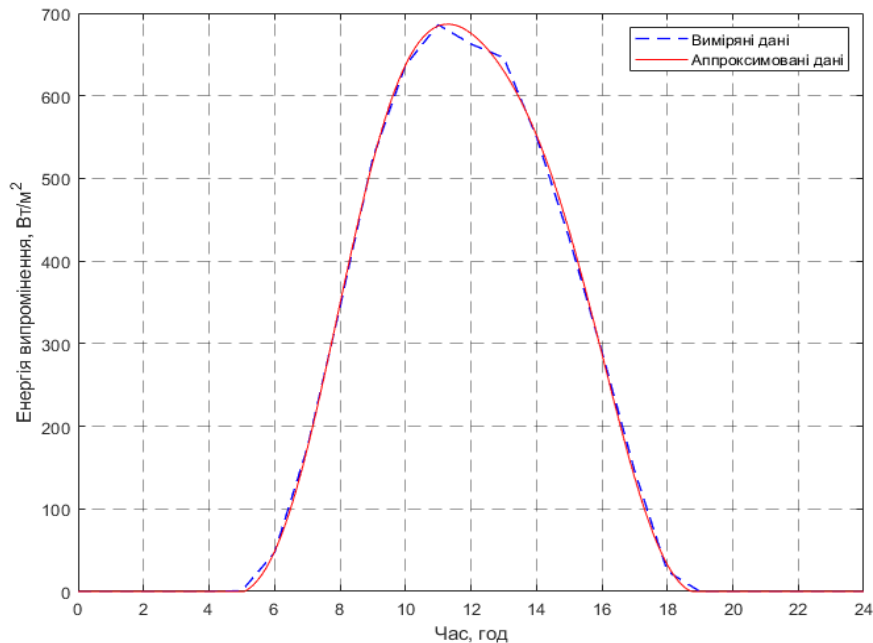


Рис. 1. Добова залежність сонячного опромінення

Fig. 1. Daily dependence of solar radiation

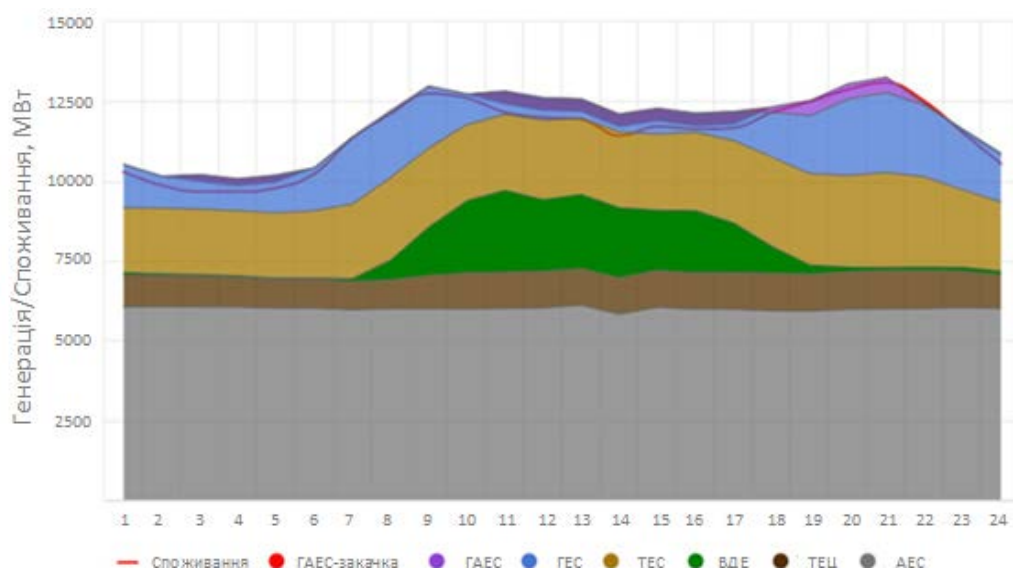


Рис. 2. Відомий графік навантаження

Fig. 2. A known load graph

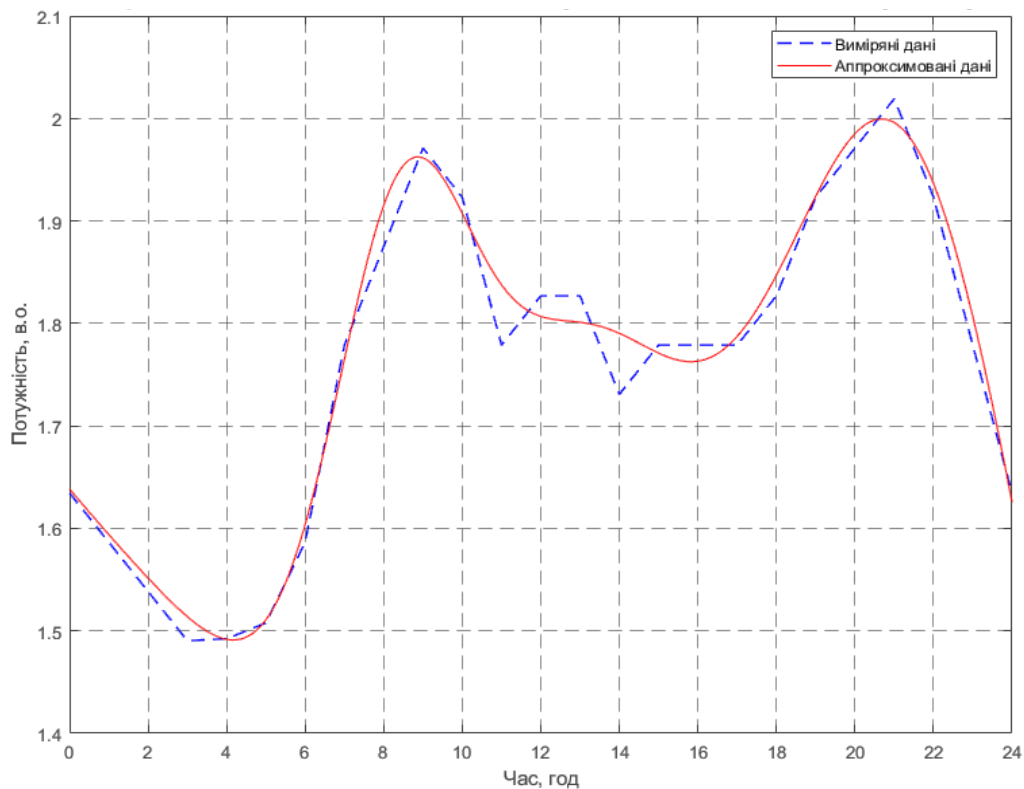


Рис. 3. Приведене споживання потужності від моменту часу

Fig. 3. Dependence of the power value calculated to the base from the moment of time

У процесі дослідження змодельоване підключення до мережі СЕС та джерела накопичення електричної енергії, за допомогою якого вдалося компенсувати навантаження приблизно з 6:00 до 17:00 за рахунок заряду батареї вночі, у години найменшого споживання електроенергії (рис. 5).

Для випадку, коли мережа функціонує без ВДЕ, СЕС, за рахунок НЕЕ відбувається компенсація і вранішнього піку споживання, і вечірнього. На рис. 6 видно, що споживання залишається в межах 0,8...0,9 МВт, потужністю НЕЕ (0,05 МВт) вдалося компенсувати навантаження двічі на добу. Процес заряду батареї протягом добового часу проілюстровано на рис. 7.

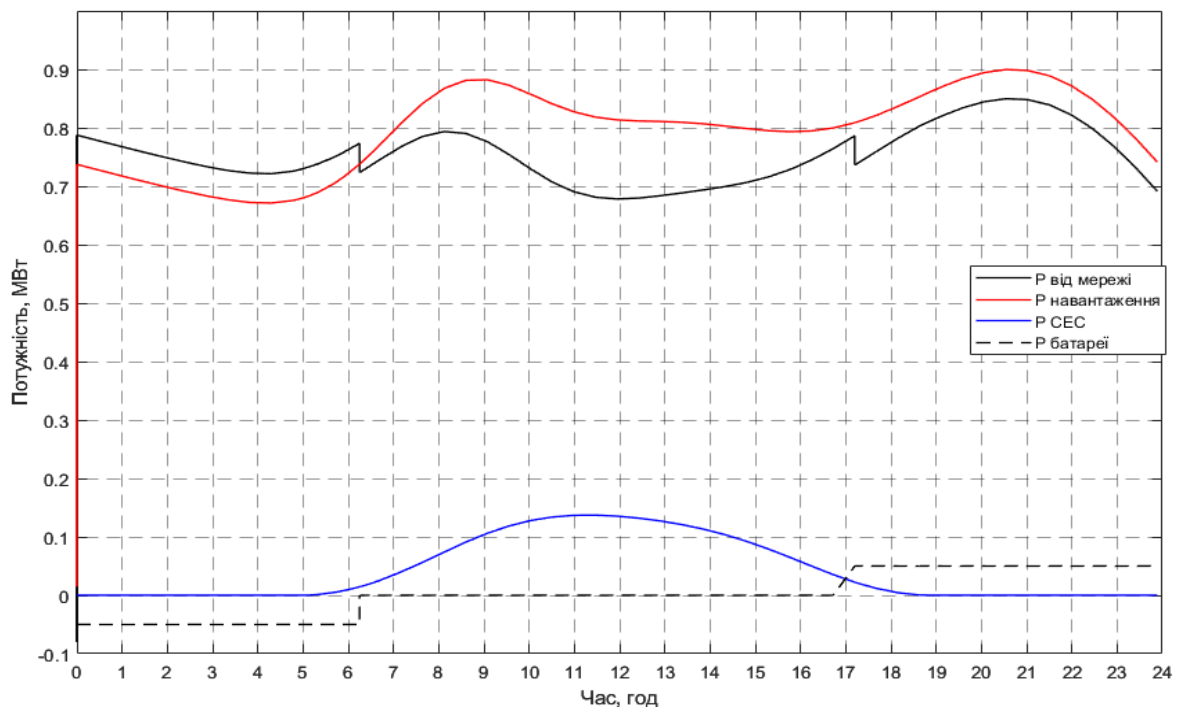


Рис. 4. Потужність в мережі з увімкненою СЕС та НЕЕ

Fig. 4. Power in the grid, with connected solar power plant and electric energy storage

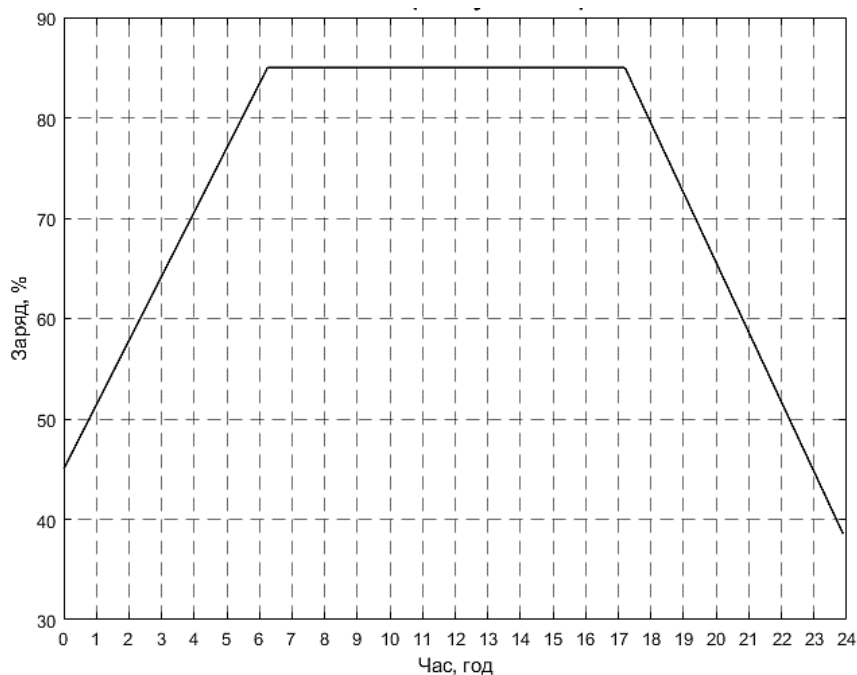


Рис. 5. Стан заряду батареї протягом добового часу з підключеною СЕС

Fig. 5. State of charge of the battery during the time of day with the solar power plant connected

У випадку, коли не була підключена СЕС, але був увімкнений НЕЕ, компенсувати навантаження в мережі вдалося приблизно з 6:00 до 11:00 та з 17:00 до 24:00, тобто в ранішній та вечірній пік навантаження енергосистеми. Батарея в цьому досліді заряджалась двічі на добу, в середньому мала 70 % заряду, а в першому випадку, коли заряджалась вночі, заряд досягав 85 % ємності.

Висновки. Розглянуті приклади з моделюванням накопичувача з фіксованою потужністю заряду / розряду демонструють, що навіть при незначній ємності та потужності НЕЕ відносно потужності основної мережі досягається позитивний ефект, що полягає у вирівнюванні

кривої споживання, тобто зменшення споживання з мережі (за умови використання локальних ВДЕ). Установлено, що основним питанням є визначення оптимального алгоритму розряду батареї для плавної видачі потужності та її резервування для видачі в пік споживання.

Модернізація електричної системи з підвищенням рівня напруги в розподільній мережі з напруги 10 кВ на 20 кВ, поряд з використанням відновлюваних джерел та накопичувачів електроенергії, відкриває можливості як зниження втрат електроенергії, так і підвищення статичної й динамічної стійкості системи.

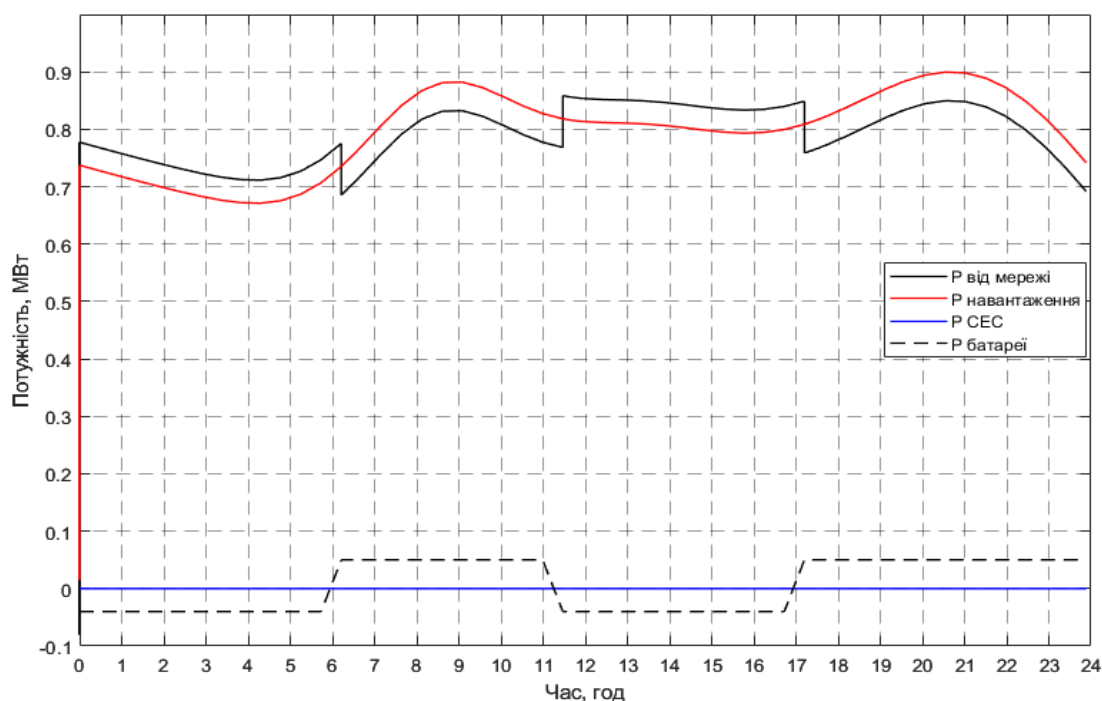


Рис. 6. Потужність у мережі з накопичувачем електричної енергії без СЕС

Fig. 6. Power in the grid, with connected storage of electrical energy without a solar power plant

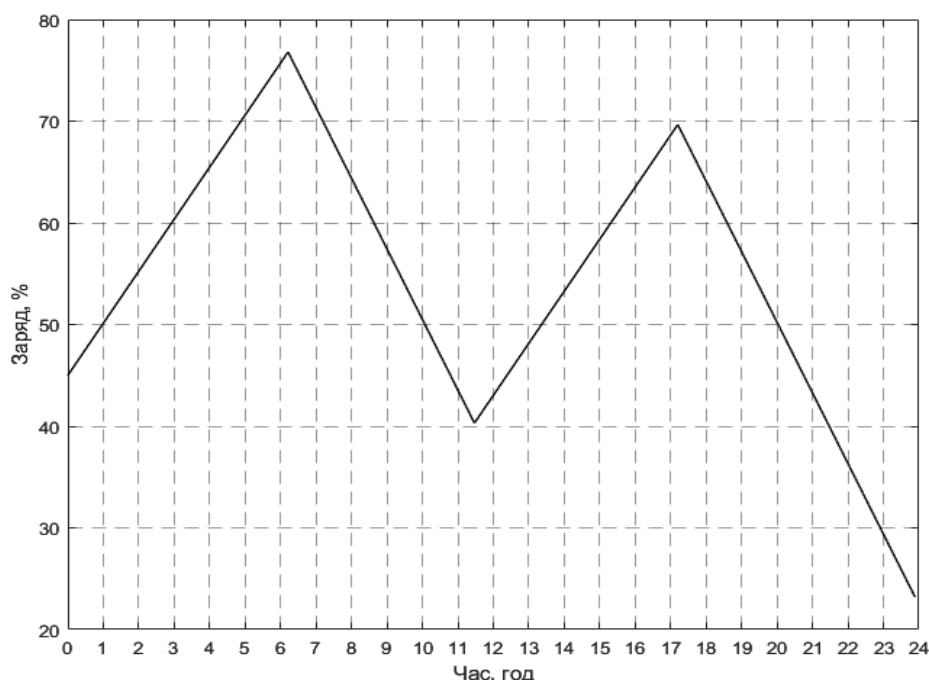


Рис. 7. Стан заряду батареї протягом добового часу без СЕС

Fig. 7. State of charge of the battery during the day without a solar power plant

Відновлювані джерела розкривають повною мірою свої позитивні властивості та підсилюють можливості з розв'язання проблеми задоволення прогнозованих енергетичних потреб, включаючи розв'язання проблеми зміни клімату шляхом інтеграції більшої кількості енергії з відновлюваних джерел і підвищення ефективності технологій традиційних джерел енергії на шляху до декарбонізації генерації. Розвиток електричної мережі має підтримувати надійну та стійку систему постачання електроенергії, а накопичення енергії може відігравати важливу роль у вирішенні цих проблем шляхом покращення режимних параметрів мережі, зниження вартості електроенергії та забезпечення високої якості електропостачання, а також скорочення капіталовкладень. Загалом накопичення енергії може суттєво підвищити «живучість» системи в надзвичайних ситуаціях.

ПОСИЛАННЯ

1. Mateo, C., Reneses, J., Rodriguez-Calvo, A., Frías, P., & Sánchez, Á. (2016). Cost-benefit analysis of battery storage in medium-voltage distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10 (3), 815–821. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0389>.
2. Фіалко, Н. М., Тимченко М. П. "Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення." *Промышленная теплотехника* (2017).
3. Кирик В. В. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи / В. В. Кирик, Б. В. Циганенко, О. С. Яндульський. К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2018. 233 с.
4. Short, T. A. (2014). *Electric power distribution handbook*. CRC press.
5. Becker, A., Loges, H., Kippelt, S., Gitis, A., Merei, G., Echternacht, D., & Witzmann, R. (2015, November). Electricity storage systems in medium-and low-voltage networks. In *International ETG Congress 2015; Die Energiewende-Blueprints for the new energy age* (pp. 1–8). VDE.
6. Shah, Junaid. "The Top 5: Largest Battery Energy Storage Systems Worldwide" *Saur Energy International*, 1 Sept. 2022, www.saurenergy.com/solar-energy-news/the-top-5-largest-battery-energy-storage-systems-worldwide. Accessed 14 Mar. 2023.

2022, www.saurenergy.com/solar-energy-news/the-top-5-largest-battery-energy-storage-systems-worldwide. Accessed 14 Mar. 2023.

7. "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)" *European Commission*, re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html. Accessed 14 Mar. 2023.

REFERENCES

1. Mateo, C., Reneses, J., Rodriguez-Calvo, A., Frías, P., & Sánchez, Á. (2016). Cost-benefit analysis of battery storage in medium-voltage distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 10 (3), 815–821. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0389>.
2. Fialko, N. M., Tymchenko M. P. "Tekhnologii nakopychennia enerhii u skladi intelektual'nykh system enerhoza-bezpechennia" [Energy storage technologies as part of intelligent energy supply systems] *Promyshlennaia teplotekhnika* (2017). [in Ukrainian]
3. Kyryk V. V., Tsyhanenko B. V., Yandul's'kyj O. S. Rozpodil'ni elektrychni merezhi napruhoiu 20 kV ta efektyvnist' ikh roboty [Distribution electrical networks with a voltage of 20 kV and the efficiency of their work] «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2018. 233 s. [in Ukrainian]
4. Short, T. A. (2014). *Electric power distribution handbook*. CRC press.
5. Becker, A., Loges, H., Kippelt, S., Gitis, A., Merei, G., Echternacht, D., & Witzmann, R. (2015, November). Electricity storage systems in medium-and low-voltage networks. In *International ETG Congress 2015; Die Energiewende-Blueprints for the new energy age* (p. 1–8). VDE.
6. Shah, Junaid. "The Top 5: Largest Battery Energy Storage Systems Worldwide" *Saur Energy International*, 1 Sept. 2022, www.saurenergy.com/solar-energy-news/the-top-5-largest-battery-energy-storage-systems-worldwide. Accessed 14 Mar. 2023.
7. "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)" *European Commission*, re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html. Accessed 14 Mar. 2023.