

УДК 621.3.015.1(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-5>

АНАЛІЗ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОЕС УКРАЇНИ

Бобров Олексій Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,

викладач спеціальних та електротехнічних дисциплін

Відокремленого структурного підрозділу «Фаховий коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара»

ORCID: 0000-0002-1872-8900

Ярошенко Яків Васильович,

аспірант кафедри електротехніки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID: 0000-0002-0252-8170

*Режим роботи Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕС) визначають з огляду на баланс виробництва та споживання, технічне обслуговування мережевого та генеруючого обладнання, можливості ліквідації аварійних ситуацій в генеруючому обладнанні електростанції та відключень магістральних ліній електропередачі. З метою недопущення порушення режиму роботи ОЕС України або окремих її ланок через певні фактори компанія «Укренерго» вживала необхідних заходів щодо обмеження споживання електроенергії та потужності, а також застосовувала спеціальні графіки та аварійні системи для зниження потужності. Графіки електричних навантажень використовуються для аналізу споживання електроенергії, планування генерування потужності, виявлення пікових навантажень, оцінювання ефективності енергоспоживання та інших цілей. Вони можуть бути корисними для побудови енергетичних профілів, розв'язання проблем з енергоефективністю та оптимізації систем електроживлення. **Метою роботи** є обґрунтування кількості маневрової генерації, яка могла б забезпечити необхідні резерви та ефективно компенсувати різке збільшення споживання електроенергії у вечірні години. **Методика** – розрахунок за допомогою аналізу графіків електричних навантажень, з урахуванням реальних показників об'єднаної енергосистеми України. **Наукова новизна** дослідження полягає у впровадженні та обґрунтуванні використання водневих накопичувачів енергії для балансування потужностей української енергосистеми. У роботі встановлено, що енергосистема України потребує широкомасштабного балансування потужності, в якому воднева енергетика здатна відігравати ключову роль у сталому розвитку всього енергетичного сектору. Для підвищення ефективності та стабільності енергетичного сектору повинна активно впроваджуватися стратегічна зміна конфігурації графіків електричних навантажень. Це передбачає використання акумулюючих потужностей, що сприятиме зниженню вартості електроенергії для кінцевих споживачів. Проведений аналіз добових графіків електричних навантажень в енергосистемі України показав, що вже натеper країна стикається з дефіцитом акумулюючих потужностей у розмірі близько 1 ГВт.*

Ключові слова: електроенергетика, відновлювальні джерела енергії, електростанція, електропостачання, альтернативна енергетика, навантаження, маневреність.

Bobrov Oleksii, Yaroshenko Yakiv. Analysis of electrical load schedules of UPS of Ukraine

*The IPS operation mode is determined based on the balance of production and consumption, maintenance of grid and generating equipment, the ability to eliminate emergencies in the generating equipment of a power plant and outages of main power transmission lines. In order to prevent disruption of the IPS of Ukraine or its individual links due to certain factors, Ukrenergo took the necessary measures to limit electricity consumption and power, as well as applied special schedules and emergency systems to reduce power. Electricity load charts are used to analyse electricity consumption, plan power generation, identify peak loads, assess energy efficiency and other purposes. They can be useful for building energy profiles, solving energy efficiency problems, and optimising power supply systems. **The purpose of the study** is to justify the amount of shunting generation that could provide the necessary reserves and effectively compensate for the sharp increase in electricity consumption in the evening. **Methodology** – calculation based on the analysis of electrical load graphs, taking into account the actual performance of the integrated power system of Ukraine. The scientific novelty of the study lies in the implementation and justification of the use of hydrogen energy storage for balancing the capacities of the Ukrainian power system. The paper establishes that Ukraine's power system needs large-scale power balancing, in which hydrogen energy can play a key role in the sustainable development of the entire energy sector. To improve the efficiency and stability of the energy sector, a strategic reconfiguration of electricity load schedules should be actively implemented. This involves the use of storage capacities, which will help to reduce the cost of electricity for end users. An analysis of the daily electricity load schedules in Ukraine's power system has shown that the country is already facing a shortage of storage capacity of about 1 GW.*

Key words: electric power industry, renewable energy sources, power plant, electricity supply, alternative energy, load, manoeuvrability.

Вступ. Об'єднана енергетична система України (далі – ОЕС України) – це сукупність атомних, теплових, гідравлічних і гідроакумулюючих електростанцій, теплоелектроцентралі, а також вона включає електростанції з відновлювальних джерел енергії (вітряні, сонячні та інші), магістральні електричні мережі Укренерго та розподільчі електромережі (обленерго), які об'єднані спільним режимом виробництва, передачі та розподілу електричної та теплової енергії [1].

Режим роботи ОЕС визначають з огляду на баланс виробництва та споживання, технічне обслуговування мережевого та генеруючого обладнання, можливості ліквідації аварійних ситуацій у генеруючому обладнанні електростанції та відключень магістральних ліній електропередачі. З метою недопущення порушення режиму роботи ОЕС України або окремих її ланок через певні фактори компанія «Укренерго» вживала необхідних заходів щодо обмеження споживання електроенергії та потужності, а також застосовувала спеціальні графіки та аварійні системи для зниження потужності [2].

Основними операторами інформації в ОЕС виступають графіки електричних навантажень (далі – ГЕН), тому можна сказати, що такий графік є інструментом для візуалізації споживання електричної енергії протягом певного часового періоду. Він відображає залежність між часом і споживаною електричною потужністю [3; 4].

На графіку електричних навантажень можуть бути відображені різні параметри, як-от сила струму, активна та реактивна потужності. Графік може мати різні шкали по осі абсцис (час) і ординат (потужність) залежно від вимог і контексту. Графіки електричних навантажень використовуються для аналізу споживання електроенергії, планування генерування потужності, виявлення пікових навантажень, оцінювання ефективності енергоспоживання та інших цілей. Вони можуть бути корисними для побудови енергетичних профілів, розв'язання проблем з енергоефективністю та оптимізації систем електроживлення. Саме тому надалі пропонується більш детальний огляд на деякі з основних ГЕН.

Розглянемо особливості добових графіків навантаження, котрі було побудовано на основі даних «Укренерго» за 2021 рік (рис. 1.1 та 1.2).

Підтримання необхідного балансу добового та сезонного виробництва і споживання електроенергії, її потужності для Об'єднаної енергетичної системи України до кінця 2021 року забезпечувалося сумісним використанням, головним чином, електростанцій теплових

і гідроелектростанцій, що значно ускладнює диспетчерський контроль за режимом роботи ОЕС [1]. Найбільша проблема в управлінні такими «шаблонами» генерації енергосистеми виникають під час нічних «просадок» навантаження. Тому ці ускладнення найбільш виражені влітку, особливо у вихідні дні, коли попит на електроенергію дуже високий протягом лівової частини доби [5; 6].

Для розуміння системності споживання (попиту) та генерації (вироблення) електроенергії до розгляду пропонується масив графіків, розроблений та досліджений на основі даних Укренерго про ОЕС (станом на кінець 2021 року), що також використовуються для аналітики європейським енергетичним моніторинговим агентством [7].

Проведемо аналіз погодинних та режимних графіків електричного навантаження і генерації за один день кожної пори року: 24.03.21 р., 24.06.2021 р., 24.09.2021 р. та 24.12.2021 р., які наведено на рисунку 1.3.

Почнемо з добового графіка за період 24 годин 24 березня 2021 року (рис. 1.3, а).

Далі продовжимо роботу із цими графіками на прикладі дня 24 червня 2021 року.

Як бачимо, крива генерації балансує впритул до стовпчиків попиту на електроенергію. Це пов'язано з тим, що опалювальний сезон добігав свого кінця, а сезон вироблення електроенергії з відновлюваних джерел – навпаки, набирив обертів.

Ситуація для червня та вересня споріднена показникам навантаження в березні 2021 року. Інша справа – це графік попит/генерації за грудень 2021 року, коли рівень споживання зростає відповідно до пори року і початку опалювального сезону. У вказаний період яскраво виражений дефіцит електроенергії, особливо в пікові години навантаження.

Якщо говорити глобально, то дефіцит на попит електроенергії в ОЕС України за 2021 рік з'являється з листопада і триває аж до завершення календарної зими, поки погодні умови не дають змогу виконувати балансування енергомережі за рахунок ГАЕС та використовувати як додатковий «балансир» ТЕС, котрі розвантажуються на початку березня через закінчення опалювального сезону. Крім того, існує класичний індикатор нерівномірності графіку електричних навантажень, які можна використовувати для аналізу та отримання більш конкретних висновків [1, 16].

Проблематика, яку прийнято до розгляду, базується на потребі в швидких, балансуєчких потужностях для ОЕС України. Адже вже

у 2019 «Укренерго» вперше зіткнулося з труднощами в балансуванні енергосистеми через значний провал між споживанням і генерацією, який виник унаслідок, у тому числі, наповнення мережі енергією з відновлюваних джерел (СЕС, ВЕС тощо) (у цьому разі не розглядається ГЕС та ГАЕС) [2].

Для прикладу наведено графік із заповненою площиною за 24 вересня 2021 року (рис. 1.4), де яскраво видно синій сегмент, котрий

говорить нам про те, що генерація зросла саме в пікові години роботи СЕС, коли попит на електроенергію серед побутових споживачів не був такий високий, як до 10:00 або з 19:00 ввечері.

Повертаючись до чотирьох дат 2021 року, проведемо аналіз значень представлених графіків.

За загальне число робочих годин із максимальним навантаженням у період 24 грудня відповідає така залежність:

Січень 2021	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	середньодобовий попит	дефіцит/профіцит
Українерго, ГВт	19,09	18,6	17,21	18,49	18,83	18,38	18,62	17,83	17,35	17,43	18,92	19,27	19,35	19,24	20,03	20,09	20,01	21,34	21,49	21,78	21,34	20,04	18,97	18,39	19,27	19,17	19,32	19,48	19,6	19,14	18,44	19,74	дефіцит
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98	20,37	20,96	20,96	20,42	20	20,75	20,89	21,38	21,26	21,02	20,3	19,18	19,38	19,58	20,26	19,53	18,45	18,37	17,69	19,68	профіцит			
Українерго, ГВт	19,09	19,77	19,67	19,52	19,45	19,47	19,68	21,08	20,98																								

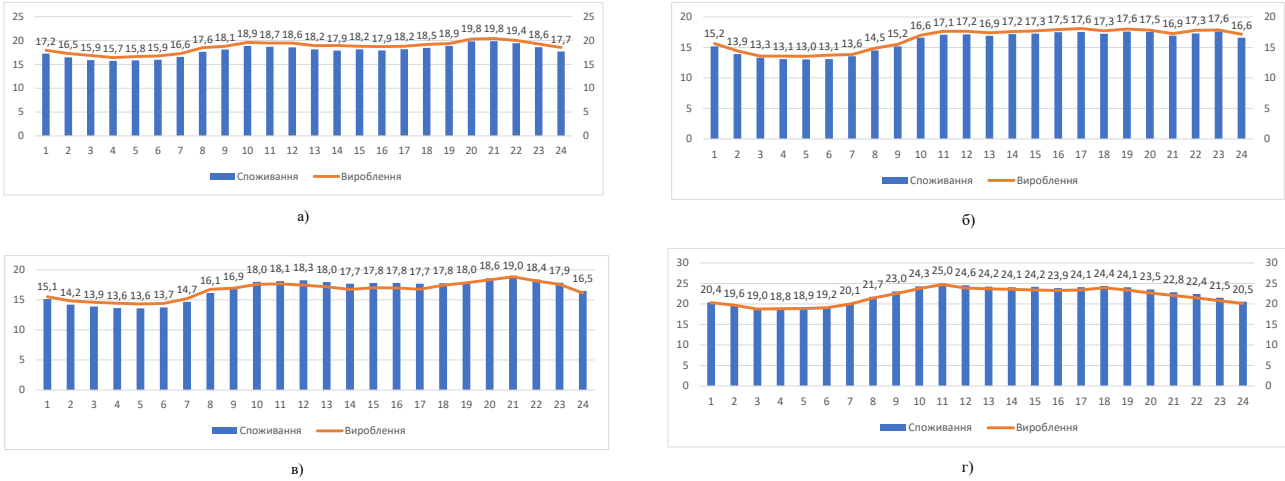


Рис. 1.3. Погодинні та режимні графіки електричного навантаження і генерації за: а – 24.03.2021 р.; б – 24.06.2021 р.; в – 24.09.2021 р; г – 24.12.2021 р.

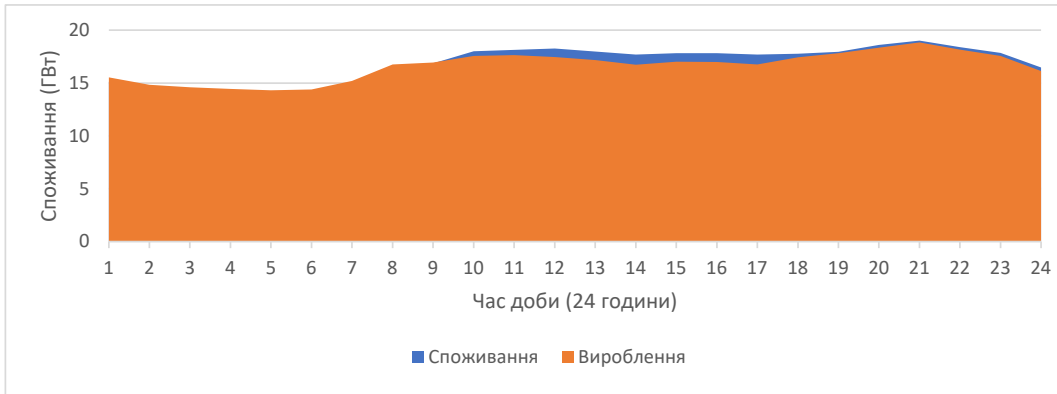


Рис. 1.4. Погодинний графік електричного навантаження за 24.09.2021 р.

$$T_{\max P}^{\text{Зима}} = \frac{t * \sum P_i^{\text{Зима}}}{P_{\max}^{\text{Зима}}}; \quad (1.1)$$

де: $P_i^{\text{Зима}}$ – загальна потужність за і-ий проміжок часу; $P_{\max}^{\text{Зима}}$ – максимальна задіяна потужність за період дослідження; t – інтервал між замірами (1,0 год у період між 00:00 по 23:59 включно (приймається 1,0), тобто

$$T_{\max P}^{\text{Зима}} = \frac{1 * 523,4}{24,97} = 20,96 \text{ год} \quad (1.2).$$

Відповідно до розрахунків і коментарів вище, можна знайти коефіцієнт заповнення графіків (натепер розглядаємо грудень 2021 року):

$$K_{\text{ЗГ}}^{\text{Зима}} = \frac{t * \sum P_i^{\text{Зима}}}{P_{\max}^{\text{Зима}} * T_m}; \quad (1.3)$$

У такому разі T_m – це загальна тривалість вимірювального періоду, що дорівнює 24 годинам. Отже:

$$K_{\text{ЗГ}}^{\text{Зима}} = \frac{t * \sum P_i^{\text{Зима}}}{P_{\max}^{\text{Зима}} * T_m} = \frac{1 * 523,4}{24,97 * 24} = 0,87 \quad (1.4).$$

З метою перевірки дисперсії заповнення значень потужності під час побудови ГЕН за 24 грудня 2021 року можна використати таку формулу:

$$P_{\text{CP}}^{\text{Зима}} = \frac{t * \sum P_i^{\text{Зима}}}{T_m} = \frac{1 * 523,4}{24} = 21,8 \text{ ГВт} \quad (1.5).$$

Отже, значення 21,8 ГВт фактично рівнозначне тому значенню, яке було занесено в таблицю, відповідно, додаткових кореляцій для кожного з досліджуваних періодів проводити необхідності немає. Коефіцієнти максимумів також будуть рівними розрахованим вище і занесеним показникам у таблиці 1.

Повертаючись до початку, визначимо коефіцієнт максимуму для заданого періоду:

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}^{\text{Зима}}}{P_{\text{mid}}^{\text{Зима}}} = \frac{24,97}{21,8} = 1,145; \quad (1.6)$$

Для енергетичних систем найоптимальнішим є виробництво потужності, яка працює за ідеально рівномірним графіком навантаження. Такий графік навантаження відповідав

би середньодобовій величині споживаної потужності. Отже, потрібно визначити відповідні значення погодинної ставки навантаження відповідної електропередавальної організації (обленерго), які допоможуть досягти максимально рівномірного щоденного графіка навантаження в об'єднаній енергосистемі [1; 4; 8].

На період до 2035 року для рівнів інтеграції ВДЕ 25% від загального споживання електроенергії в ОЕС України спостерігається дефіцит високоманеврових потужностей [9; 10]. Така проблема може бути частково розв'язана за допомогою будівництва систем акумулювання електричної енергії або глибокої реконструкції наявних енергоблоків ТЕС. Часу на пошук та реалізацію ефективних рішень майже не залишилось, адже з огляду на таблицю 1 у додатку А ми вже маємо високий дефіцит у ГВт від установленної потужності в холодну пору року (дані за 2021 рік) [7].

Визначимо теоретичну величину регулювання ГЕС (для маневрових потужностей в ОЕС України):

$$A_{water}^{Зима D} = P_{maxWo}^{Зима D} - P_{minWo}^{Зима D} = 2,62 - 0,1 = 2,52 \text{ ГВт}, \quad (1.7)$$

де:

$P_{maxГЕС}^{Зима D}$ – максимальна потужність ГЕС, ГВт,
 $P_{minГЕС}^{Зима D}$ – мінімальна потужність ГЕС, ГВт.

Так само для ТЕС:

$$A_{ТЕС}^{Зима D} = P_{maxТЕС}^{Зима D} - P_{minТЕС}^{Зима D} = 6,33 - 3,99 = 2,34 \text{ ГВт}, \quad (1.8)$$

де:

$P_{maxТЕС}^{Зима D}$ – максимальна потужність ТЕС, ГВт,
 $P_{minТЕС}^{Зима D}$ – мінімальна потужність ТЕС, ГВт,
а необхідна глибина за 24 грудня 2021 року становить:

$$A_P^{Зима D} = P_{maxP}^{Зима D} - P_{minP}^{Зима D} = 24,97 - 18,28 = 6,69 \text{ ГВт} \quad (1.9).$$

Дефіцит маневрових потужностей тільки за 24 грудня 2021 р. (з урахуванням похибки в $\pm 10\%$) становить:

$$E_{Ap}^{Зима D} = A_{water}^{Зима D} + A_{heat}^{Зима D} - A_P^{Зима D} = 2,52 + 2,34 - 6,69 = -1,84 \text{ ГВт} \quad (1.10)$$

У таблиці 1.1 наведено коефіцієнти графіків електричних навантажень у режимні дні 2021 року по кожному місяцю.

Також для порівняння наведемо таку саму таблицю за 2019 рік.

Із наведеного вище, можна отримати таке: середньомісячний дефіцит електроенергії в ОЕС України, продовжував зростати й тільки з 2019 по 2021 рік змінився на:

$$\Delta_{ОЕСУ-2} = \Delta_{ОЕСУ21} - \Delta_{ОЕСУ19} = 1,07 - 0,91 = 0,16 \text{ ГВт}, \quad (1.11)$$

де: $\Delta_{ОЕСУ21}$ – середньомісячний дефіцит електроенергії протягом 2021 року; $\Delta_{ОЕСУ19}$ – середньомісячний дефіцит електроенергії протягом 2019 року.

Очевидно, що ситуація після повномасштабного вторгнення не покращилася, а тільки значно погіршилася, і тому для уникнення в майбутньому проблем, з якими енергетична система України зіткнулася декілька років тому, необхідно розробити комплексну систему розв'язання питання балансування ОЕС [9; 8].

З огляду на графіки навантаження, особливо влітку та восени, стає очевидним, що за збільшення відносної частки відновлюваної енергії (ВДЕ) до 25–35% енергетична система України може стати такою, що практично не піддається керуванню [2; 4; 11]. Недостатньо ємності акумулюючих станцій для згладжування коливань

Таблиця.1.1

Коефіцієнти графіків електричних навантажень у режимні дні 2021 року

2021 рік	T_maxP/період, год	K _{зг}	P _{сп} , ГВт,	K _{max}	A _{heat} , ГВт,	A _{water} , ГВт,	A _{power} , ГВт,	Дефіцит, ГВт,
Грудень	20,95	0,9	22,03	1,13	2,33	2,52	6,69	-1,84
Листопад	21,32	0,9	19,77	1,11	1,24	2,45	5,74	-2,05
Жовтень	20,93	0,9	16,61	1,16	1,19	3,07	5,07	-0,81
Вересень	21,97	0,9	16,96	1,12	1,3	1,76	5,43	-2,37
Серпень	21,43	0,9	14,97	1,13	1,88	2,08	4,44	-0,48
Липень	22,1	0,9	14,97	1,11	1,81	2,23	3,98	0,06
Червень	21,83	0,9	16,06	1,11	2,79	2,09	5,08	-0,2
Травень	21,79	0,9	14,84	1,12	1,07	2,53	4,76	-1,16
Квітень	21,03	0,9	16,29	1,15	1	3,34	5,06	-0,72
Березень	22,31	0,9	18,91	1,09	1,26	2,64	4,89	-0,99
Лютий	21,16	0,9	20,23	1,1	1,95	2,85	5,59	-0,79
Січень	20,83	0,9	18,23	1,13	1,65	1,59	4,7	-1,46

Таблиця.1.2

Коефіцієнти графіків електричних навантажень у режимні дні 2019 року

2019 рік	T_maxP/період, год	K _{зг.}	P _{ср} , ГВт,	K _{мак.}	A _{heat} , ГВт,	A _{water} , ГВт,	A _{power} , ГВт,	Дефіцит, ГВт,
Грудень	21,96	0,92	18,45	1,09	2,11	1,36	5,43	-1,96
Листопад	20,87	0,87	18,39	1,15	1,76	2,15	5,21	-1,3
Жовтень	21,05	0,88	16,72	1,14	1,79	2,12	5,57	-1,66
Вересень	20,91	0,87	16,08	1,15	3,14	2,4	5,54	0
Серпень	21,28	0,89	14,86	1,13	1,61	2,01	3,24	0,38
Липень	22,09	0,92	15,47	1,09	1,61	1,66	4,21	-0,94
Червень	22,07	0,92	16,26	1,09	1,37	2,09	4,83	-1,37
Травень	23,55	0,98	15,79	1,02	1,13	2,43	3,72	-0,16
Квітень	21,81	0,91	16,56	1,10	0,79	2,56	4,58	-1,23
Березень	22,54	0,94	17,58	1,06	0,55	2,38	3,73	-0,8
Лютий	22,75	0,95	19,83	1,05	0,86	1,99	4,16	-1,31
Січень	22,71	0,95	21,64	1,06	2,56	2,28	5,37	-0,53

виробництва електроенергії в денний час та для компенсації збільшеного споживання в години-пік уранці та ввечері. У такій ситуації регулятор енергосистеми буде змушений відключати СЕС від електричної мережі, оскільки їх генерація енергії буде непотрібною. Це може призвести до зростання вартості «чистої» електроенергії для підприємств та населення. Тому необхідно комплексно підійти до цієї проблеми і прогнозувати майбутні труднощі в післявоєнному відновленні нашої країни [4].

Звісно, що найефективніший підхід із боку держави для розв'язання проблеми зменшення нерівномірності графіків електричного навантаження може бути таким:

- налагодження оптимальної конфігурації генеруючих потужностей у системі електропостачання;
- використання перетоків з європейськими енергосистемами;
- залучення споживачів до вирівнювання графіка навантаження енергосистеми за допомогою адміністративних (обмежувальних) і економічних (стимулювальних) заходів.

Згідно з проведеними розрахунками, українській системі генерації електроенергії станом на кінець 2021 року не вистачало регулювальних генеруючих потужностей, які частково компенсувалися завдяки накопиченню води для ГАЕС у нічний час. Проте ці резерви вже тоді було майже повністю вичерпано, а з руйнуванням Каховського водосховища ситуація стала ще гірше [13]. Якщо частка відновлюваної енергії (ВДЕ) у загальній системі генерації в Україні

збільшиться до 25%, як це передбачав план розвитку до 2035 року [14], система може виявитися розбалансованою. Отже, якщо не буде прийнято відповідних мір, під час відновлення енергосистеми після закінчення російського вторгнення ми фактично припустимося таких самих помилок.

Висновки:

– Для підвищення ефективності та стабільності енергетичного сектора активно впроваджується стратегічна зміна конфігурації графіків електричних навантажень в європейських енергосистемах. Це передбачає використання акумулюючих потужностей, що сприятиме зниженню вартості електроенергії для кінцевих споживачів;

– Проведений аналіз добових графіків електричних навантажень в енергосистемі України показав, що вже натепер держава стикається з дефіцитом акумулюючих потужностей у розмірі близько 1 ГВт. При цьому після завершення бойових дій на території України цей показник, скоріше за все, буде в декілька разів більшим. Особливістю української енергосистеми також є те, що гідроелектростанції працювали в повному режимі під час паводка і майже не мали можливості маневрувати. Через утрату ключової Каховської ГЕС ситуація в цьому сегменті перевищує будь-які критичні показники. За такого режиму роботи ГЕС та високої бази атомних електростанцій в енергобалансі відсутня достатня кількість маневрової генерації, яка могла б забезпечити необхідні резерви та ефективно компенсувати різке збільшення споживання електроенергії у вечірні години.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Tkach D.K. The current state of the fuel and energy complex of Ukraine. «Scientific notes of the University» KROK, 2018, 45–51. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2018-52-45-51>
2. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія. І.В. Хоменко та ін. Харків : НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с.
3. Находов В.Ф., Замулко А.И., Мохаммад Аль Шарари. Мединцева Д.А. *Збірка наукових праць VIII міжнар. наук.-техн. конф. молодих дослідників, аспірантів та студентів «Енергетика. Екологія. Людина».* Київ, 1–3 червня 2016 р. Київ : НТУУ «КПІ». С. 265–269.
4. Khomenko, I., Omelchenko, I., Stasiuk, I. Development of the concept of multi and continuous monitoring and control of energy consumption in electric networks. Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies, 2017, (23(1245)), 131–136. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.23.21>
5. Калінчик В.П. Оцінка та аналіз методів вирівнювання графіків навантаження виробничих систем. *Енергетика.* 2013. № 3. С. 57–63.
6. Ukraine Real-Time Electricity Data Explorer – Data Tools – IEA. (б. д.). IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ukraine-real-time-electricity-data-explorer>
7. Кармазін О.О. Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.08. Київ, 2019. 143 с
8. Находов, В.Ф. Управління режимами споживання та ефективністю викорисутання електричної енергії в енергетичних системах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси». Київ, 2018. 432 с.
9. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Mathew Aneke, Meihong Wang, Process and Energy Systems Engineering Group, School of Engineering, University of Hull, HU6 7RX, United Kingdom. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
10. Yaroshenko Y., Bobrov O., Tsyplenkov D., Kuznetsov V., Savvin O. Electricity storage systems. Collection of Research Papers of the National Mining University, 2022, 71, 131/144. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.131>.
11. Мохаммад Ібрагім Мохаммад Аль Шарарі. Адресне управління режимами споживання електричної потужності в енергетичній системі. 2017: URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19081>
12. Веремійчук Ю.А. Методи комплексного керування електроспоживанням в умовах реформування ринкових відносин : дис. ... канд. техн. наук. Захищено: 06.10.2015 р.
13. Учасники проєктів Вікімедіа. 2023, 6 червня. Підрив Каховської ГЕС. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Підрив_Каховської_ГЕС
14. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». (б. д.). *Офіційний вебпортал парламенту України.* URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
15. Chen, D., Bai, H., Zhu, J., Wu, C., Zhao, H., Wu, D., Jiao, J., Ji, P., & Mu, S. Multiscale Hierarchical Structured NiCoP Enabling Ampere-Level Water Splitting for Multi-Scenarios Green Energy-to-Hydrogen Systems. *Advanced Energy Materials.* 2023, URL: <https://doi.org/10.1002/aenm.202300499>
16. Відновлювані джерела енергії / за заг. ред. С.О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

REFERENCES:

1. Tkach, D. K. (2018). The current state of the fuel and energy complex of Ukraine. "Scientific notes of the University" "KROK", 45–51. Retrieved from <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2018-52-45-51>
2. Khomenko, I. V., Plakhtiy O. A., Nerubatskyi V. P., Stasyuk I. V. (2020). *Elektroenerhetyka Ukrainy. Struktura, keruvannia, innovatsii [Electric power industry of Ukraine. Structure, management, innovations]: monograph* – Kharkiv: NTU "KhPI", LLC "Planeta-Print", 132 p. ISBN 978-617-7897-02-5.
3. Nakhodov, A. I. Zamulko, Mohammad Al Sharary, D. A. Medintseva (2016). *Zbirka naukovykh prats VIII mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Molodykh doslidnykiv, aspirantiv ta studentiv "Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna" [Collection of Scientific Papers VIII International. science and technology conf. Young researchers, graduate students and students of "Energy. Ecology. Human"]*, Kyiv, June 1-3, Kyiv: NTUU "KPI". – с. 265-269.
4. Khomenko, I., Omelchenko, I., & Stasiuk, I. (2017). Development of the concept of multi and continuous monitoring and control of energy consumption in electric networks. Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: New solutions in modern technologies, (23(1245)), 131–136. Retrieved from <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.23.21>

5. V.P. Kalinchyk. (2013). Otsinka ta analiz metodiv vyrivniuvannya hrafikiv navantazhennia vyrobnychkykh system [Evaluation and analysis of methods of leveling load schedules of production systems] V. P. Kalinchyk, O. IN. Skachok. Energy. No. 3, P. 57–63.
6. Ukraine Real-Time Electricity Data Explorer – Data Tools – IEA. (б. д.). IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ukraine-real-time-electricity-data-explorer>
7. Karmazin, O. O. (2019). Balansova nadiinist elektroenerhetychnykh system v umovakh zrostannia chastky vidnovliuvanoi enerhetyky [Balance reliability of electric power systems in conditions of growing share of renewable energy]: diss. Ph.D. technical Sciences: 05.14.08. Kyiv, 143 p.
8. Nakhodov, V. F. (2018). Upravlinnia rezhymamy spozhyvannia ta efektyvnistiu vykorysutannia elektrychnoi enerhii v enerhetychnykh systemakh [Management of modes of consumption and efficiency of use of electric energy in energy systems]: dissertation. Dr. Tech. Sciences: 05.14.01 – energy systems and complexes / Volodymyr Fedorovych Nakhodov. Kyiv, 432.
9. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Mathew Aneke, Meihong Wang, Process and Energy Systems Engineering Group, School of Engineering, University of Hull, HU6 7RX, United Kingdom Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
10. Yaroshenko, Y., Bobrov, O., Tsyplenkov, D., Kuznetsov, V., & Savvin, O. (2022). Electricity storage systems. Collection of Research Papers of the National Mining University, 71, 131/144. Retrieved from <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.131>.
11. Mohammad Ibrahim, & Mohammad Al Sharari. (2017). Adresne upravlinnia rezhymamy spozhyvannia elektrychnoi potuzhnosti v enerhetychnii systemi [Addressable management of electric power consumption modes in the energy system]. Retrieved from <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19081>
12. Veremiychuk, Yu. A. (2015). Metody kompleksnoho keruvannia elektrospozhyvanniam v umovakh reformuvannia rynkovykh vidnosyn [Methods of integrated management of electricity consumption in conditions of reforming market relations. thesis Ph.D. technical of science Protected: 06.10. Yury Andriyovych Veremiychuk.
13. Uchasnyky proektiv Wikimedia. [Participants of Wikimedia projects]. (2023, June 6). Undermining Kakhovskaya HPP. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Підри́в_Каховської_ГЕС
14. Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku “Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist” [On the approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 “Safety, energy efficiency, competitiveness”]. (b. d.). Official website of the Parliament of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
15. Chen, D., Bai, H., Zhu, J., Wu, C., Zhao, H., Wu, D., Jiao, J., Ji, P., & Mu, S. (2023). Multiscale Hierarchical Structured NiCoP Enabling Ampere-Level Water Splitting for Multi-Scenarios Green Energy-to-Hydrogen Systems. Advanced Energy Materials. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/aenm.202300499>.
16. Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources] In general. ed. S.O. Curls – Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences, 2020. – 392 c. ISBN 978-966-999-077-8