

УДК 621.311:519.8

Євген Щербина, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-1565-4547>

Інститут загальної енергетики НАН України, 172, вул. Антоновича, м. Київ, 03150, Україна

e-mail: evg.shcherbina@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ СТРУКТУРИ ГЕНЕРУЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ У ПЕРІОД ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Ключові слова: енергетична система, прогнозні сценарії, трансформація структури, математична модель, оптимізація, графік електричного навантаження.

Мета роботи. Моделювання і аналіз можливих сценаріїв трансформації структури генеруючих потужностей Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України з урахуванням зростаючих обсягів встановлених потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та втрат енергетичної інфраструктури внаслідок російської агресії для прогнозування повоєнного відновлення і розвитку енергетики країни.

Результати роботи. Великі обсяги встановленої потужності вітрових (ВЕС) та сонячних електростанцій (СЕС) у складі української енергосистеми та їх очікуване зростання в майбутньому відповідно до цілей низьковуглецевого розвитку України і орієнтації на Європейський зелений курс значно ускладнюють роботу ОЕС у зв'язку з необхідністю балансування коливань обсягів генерації вітрової та сонячної енергії. ВЕС та СЕС є джерелами енергії з нульовою гарантованою потужністю. Через свою технологічну природу вони не можуть забезпечити стабільність частоти та потужності енергії, що постачається ними до енергосистеми, і потребують резервування додаткових маневрених потужностей для стабілізації режимів роботи ОЕС України [1]. Подальше зростання потужностей ВДЕ приводить до втрати гнучкості енергосистеми і потребує трансформації структури генеруючих потужностей енергосистеми. Проблема суттєво ускладнилась після початку повномасштабної агресії РФ, в результаті якої енергетика України зазнала великих втрат, що призвело до значних змін в енергетичному балансі. Виробництво електроенергії на теплових електростанціях (ТЕС) у 2022 р. впало на 35 %, на атомних (АЕС) – на 28 %, на теплоелектроцентралях (ТЕЦ) – на 32 %, генерація відновлюваних джерел енергії знизилась на 36 %. Загальне виробництво електроенергії в Україні у 2022 р. скоротилося на 27,5 %. В той же час зі скороченням майже на 30 % валового внутрішнього продукту споживання електроенергії у 2022 р. скоротилося на 31 %, а у 2023 р. – ще приблизно на 7 %. Найбільше постраждала маневрена потужність теплових електростанцій. Значно зменшилася (на 43 %) атомна генерація у зв'язку з окупацією Запорізької АЕС.

Ракетні удари у березні – травні 2024 р. по об'єктах маневреної генерації – тепловим та гідроелектростанціям, додатково ускладнили ситуацію, що склалась у 2022–2023 роках. Сьогодні ОЕС України знаходиться у вкрай важкому стані. Зруйновано, пошкоджено або захоплено понад 70 % усієї генерації, що мала Україна до 24 лютого 2022 р. Повністю знищені генеруючі потужності ПАТ «Центренерго». Енергетичний холдинг ДТЕК втратив 80 % своїх генеруючих потужностей. Виведено з ладу 2/3 гідроелектростанцій. Пошкоджені об'єкти частково відновлюються, але основна відбудова буде відбуватися після закінчення воєнних дій і припинення ракетних обстрілів.

У зв'язку з цим актуальною є задача прогнозування напрямків повоєнного відновлення і розвитку енергосистеми з урахуванням її поточного стану. Для вирішення цієї задачі пропонується моделювання прогнозних сценаріїв розвитку структури генеруючих потужностей ОЕС України з урахуванням зростаючих обсягів потужностей ВДЕ та втрат енергосистеми і її стану. Невизначеність термінів закінчення воєнних дій

значно ускладнює цей процес і створює додаткові умови з урахуванням відновлення пошкоджених та повернення окупованих енергетичних об'єктів до складу ОЕС. Значна втрата старої вугільної генерації дає можливість прискорити впровадження нових технологій генерації, високоманеврових потужностей і подальший розвиток ВДЕ.

В даній роботі досліджуються два сценарії – відновлення енергосистеми у перші 1–2 роки після закінчення війни та розвиток ОЕС через 3–4 роки повоєнної відбудови. Відповідно до першого, короткострокового, сценарію споживання електроенергії зросте приблизно на 15 % до 118 млрд кВт·год, вугільна генерація відновиться до 2,5 ГВт потужностей, будуть побудовані нові газові ТЕС (0,9 ГВт газотурбінних і 0,6 ГВт газопоршневих станцій), потужності ВДЕ зростуть відповідно до 0,8 ГВт ВЕС, 6,5 ГВт СЕС і 0,3 ГВт біо ТЕС. Другий, середньостроковий сценарій передбачає споживання електроенергії на рівні 135 млрд кВт·год, розвиток газової генерації до 2 ГВт (1,2 ГВт газотурбінних і 0,8 ГВт газопоршневих установок), стабілізацію вугільної генерації на рівні 2,5 ГВт і подальше зростання встановлених потужностей ВДЕ – 1,5 ГВт ВЕС, 7,5 ГВт СЕС і 0,9 ГВт біо-ТЕС. В обох сценаріях передбачається відновлення генерації ГЕС до 50 % довоєнного рівня, а також, що потужності атомної генерації залишаються на сьогоднішньому рівні – 7,8 ГВт.

Розрахунки та дослідження обох сценаріїв проведено з використанням математичної моделі визначення оптимального складу та завантаження енергоблоків теплових і атомних електростанцій та гідроагрегатів гідро- (ГЕС) і гідроакумуючих електростанцій (ГАЕС) при покритті добових графіків електричного навантаження (ГЕН) ОЕС України з урахуванням добових профілів генерації вітрових і сонячних електростанцій [2–3]. Модель розроблена в Інституті загальної енергетики НАН України і належить до класу моделей математичного програмування з цілочисельними змінними. Критерієм оптимізації є мінімум загальносистемних добових витрат на виробництво електроенергії. Система обмежень включає погодинний баланс обсягів споживання і виробництва електроенергії і детально описує технологічні умови функціонування енергоблоків теплової і атомної генерації, умови експлуатації гідроагрегатів ГЕС та ГАЕС у насосному і генераторному режимах, примусове обмеження за необхідності надлишкової генерації ВЕС і СЕС, застосування імпорту (експорту) електроенергії, режими використання акумуляційних систем накопичення енергії, а також погодинний стан енергоблоків та гідроагрегатів. Розрахунки проводяться для кожної доби року, і їх результати підсумовуються для отримання річних показників.

Результати розрахунків за першим сценарієм показали необхідність імпорту електроенергії в обсязі 2,73 млрд кВт·год (2,3 % від річного обсягу споживання). Структура електрогенерації наступна: вугільні ТЕС – 16 %, газові ТЕС і ТЕЦ – 12,5 %, АЕС – 57 %, ГЕС та ГАЕС – 5,5 %, ВДЕ – 8,8 %, в т.ч.: ВЕС – 1,5 %, СЕС – 6,2 %, біо-ТЕС – 1,1 %. За результатами розрахунків другого сценарію імпорт зростає вдвічі до 5,44 млрд кВт·год (4 % від річного обсягу споживання). Структура генерації електроенергії змінюється: вугільні ТЕС – 15,4 %, газові ТЕС і ТЕЦ – 15,3 %, АЕС – 50,9 %, ГЕС та ГАЕС – 4,8 %, ВДЕ – 13,6 %, в т.ч.: ВЕС – 2,5 %, СЕС – 6,4 %, біо-ТЕС – 4,7 %. Аналіз результатів показує, що в обох сценаріях дефіцит генерації призводить до необхідності імпорту електроенергії. При зростанні обсягів споживання зростає дефіцит генерації і, відповідно, обсяг імпорту електроенергії. Зростаючі встановлені потужності газових ТЕС і ВДЕ не покривають дефіцит виробництва електроенергії, що виникає в першу чергу у зв'язку з обмеженою генерацією АЕС і вугільних ТЕС, які працюють на максимальних потужностях. Подальше зростання обсягів споживання при відновленні промисловості і економіки країни в цілому потребує побудови нових потужностей атомної генерації для покриття базового навантаження, а також збільшення потужностей маневреної теплової і гідрогенерації для балансування зростаючих обсягів генерації ВДЕ.

Висновки. Прогнозування повоєнного відновлення і розвитку ОЕС України є актуальною задачею, що ускладнена невизначеністю термінів закінчення війни і стану об'єктів генерації та енергетичної інфраструктури внаслідок агресії рф. Запропоновані сценарії трансформації структури генерації дозволяють

з використанням математичної моделі визначення оптимального складу та завантаження генеруючих потужностей дослідити можливі напрямки розвитку енергосистеми у повоєнний період. При цьому враховані очікуване зростання потужностей ВДЕ у складі ОЕС відповідно до цілей низьковуглецевого розвитку і необхідність балансування коливань обсягів їх генерації. В розглянутих сценаріях передбачено впровадження високоманеврових потужностей газотурбінних і газопоршневих установок для часткової заміни пошкоджених вугільних ТЕС з метою підвищення гнучкості енергосистеми. Аналіз результатів розрахунків показав необхідність побудови нових потужностей АЕС і високоманеврених газових ТЕС разом з одночасним відновленням пошкоджених гідроелектростанцій та блоків вугільних ТЕС.

Посилання

1. Babak V.P., Kulyk M.M. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. No. 5. P. 100—116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
2. Шульженко С.В., Тюрютіков О.І., Тарасенко П.В. Модель математичного програмування з цілочисельними змінними визначення оптимального режиму завантаження гідроагрегатів гідроакumuлюючих електростанцій при покритті добового графіку електричних навантажень енергосистеми України. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 4(59). С. 13—23. <https://doi.org/10.15407/pge2019.04.013>
3. Шульженко С.В., Тюрютіков О.І., Іваненко Н.П. Модель математичного програмування з цілочисельними змінними визначення оптимального складу та завантаження енергоблоків теплових електростанцій та гідроагрегатів гідроакumuлюючих електростанцій при покритті добового графіку електричних навантажень енергосистеми України. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 1(60). С. 14—23. <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.014>

MODELING SCENARIOS FOR THE DEVELOPMENT OF THE GENERATING CAPACITIES STRUCTURE OF THE INTEGRATED POWER SYSTEM OF UKRAINE IN THE PERIOD OF POST-WAR RECOVERY

Evgen Shcherbina, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0002-1565-4547>
General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine
e-mail: evg.shcherbina@gmail.com

Abstract. *The purpose of the study is to model possible scenarios for the transformation and development of the generating capacities structure of the Integrated Power System of Ukraine, taking into account the growing volumes of installed renewable energy capacities and losses incurred by energy facilities as a result of russian aggression, to forecast the post-war recovery and development of the country's energy sector. Two possible scenarios for the recovery and development of generating capacities are considered - in the first years of reconstruction and a few years after the end of the war. The proposed scenarios were calculated using a mathematical programming model designed to determine the optimal composition and use of capacities to cover daily electricity load schedules.*

Keywords: power system, forecast scenarios, structure transformation, mathematical model, optimization, electric load schedule.