

Огляд режимів маневрування на атомних електростанціях Німеччини

Андрій Дзиба, студент¹ (ORCID: 0009-0004-2296-9004)

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто досвід Німеччини щодо застосування режимів маневрування на атомних електростанціях (АЕС). Описано технічні особливості, типи маневрування, а також наслідки їх використання у контексті енергетичної політики Energiewende. Визначено ключові технічні рішення, що дозволяли німецьким АЕС забезпечувати гнучкість виробництва електроенергії, та зроблено висновки щодо можливостей використання цього досвіду в Україні.

Ключові слова: атомна енергетика, маневрування потужності, енергетична система, гнучкість.

1. ВСТУП

Сучасна енергетика переживає період глибоких трансформацій, зумовлених як екологічними викликами, так і технологічним прогресом. Поступовий перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) змінює структуру енергосистем, роблячи їх більш динамічними, але водночас – менш стабільними. У цих умовах виникає потреба в джерелах електроенергії, здатних швидко реагувати на коливання виробітку сонячних і вітрових станцій, забезпечуючи баланс потужності в мережі.

Атомні електростанції традиційно вважалися джерелами базового навантаження, що працюють на постійній потужності. Проте з розвитком технологій та зростанням частки ВДЕ перед операторами постала нова задача – зробити АЕС більш гнучкими, тобто здатними до маневрування. Під маневруванням атомних станцій розуміють зміну рівня їх електричної потужності відповідно до потреб енергосистеми. Це дозволяє знижувати генерацію в години надлишку енергії з ВДЕ та збільшувати її при зростанні попиту або зменшенні відновлюваного виробництва [1].

Німеччина є показовим прикладом держави, яка впродовж кількох десятиліть активно впроваджувала концепцію «Energiewende [2] — енергетичного переходу, спрямованого на розвиток відновлюваної енергетики та поступову відмову від ядерної. До повного закриття своїх атомних електростанцій у 2023 році країна накопичила цінний досвід у сфері маневрування потужностями АЕС. Цей досвід охоплює як технічні рішення для гнучкої експлуатації реакторів, так і організаційні підходи до інтеграції таких станцій в енергосистему з великою часткою ВДЕ.

Вивчення німецького підходу до маневрування атомних електростанцій є надзвичайно актуальним для України, яка також стоїть на шляху модернізації енергетичного сектору та збільшення частки відновлюваних джерел у своєму енергобалансі.

2. ТИПИ РЕЖИМІВ МАНЕВРУВАННЯ ТА ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ

Основні режими маневрування, що застосовувалися на німецьких АЕС [3]:

• *Щоденне (добове) маневрування* — зниження потужності в нічні години або при надлишку ВДЕ.

• *Тижневе/сезонне регулювання* — адаптація вихідної потужності у відповідь на довгострокові погодні тренди і попит.

• *Режим резервної генерації* — підтримка реактора на зниженій потужності (зазвичай 50–70 %) з готовністю до швидкого підвищення виходу.

Технічні рішення, що забезпечували маневрування: системи автоматичного регулювання та цифрове управління реактором і турбінами; модернізація паливних збірок і топлогідравліки для витримки частих змін потужності; посилений моніторинг напруг, температур та вібрацій у реальному часі; оновлені процедури експлуатації та тренування персоналу для безпечного проведення маневрів.

Міжнародні методичні матеріали та дослідження IAEA [4] та NEA [5] містять рекомендації щодо неможливості безпечного виконання маневрування без відповідних модернізацій та аналізу впливу на ресурс обладнання.

3. ОПЕРАТИВНІ ПРИКЛАДИ (BROKDORF, ISAR-2 ТА ІНШІ)

Brokdorf (рис.1): реактор потужністю ~1 480 МВт електричних мав можливість зниження до ~50% номіналу і повернення до повної потужності у відносно короткий час — таке технічне виконання і оперативні процедури дозволяли використовувати його для денного балансування мережі [6].



Рисунок 1. Атомна електростанція Брокдорф (нім. Kernkraftwerk Brokdorf)

Isar2 [4]: один із прикладів, коли реактор працював у маневреному режимі протягом тривалого періоду (понад 60 днів у 2021 році) внаслідок надлишку сонячної генерації, що підкреслило роль АЕС у балансуванні ВДЕ.

4. ТЕХНІЧНІ ПРИНЦИПИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРІВ (PWR,BWR)

У реакторах типу PWR (Pressurized Water Reactor) [6] потужність регулюється за допомогою стрижнів керування, зміни концентрації бору у теплоносії та систем автоматичного управління. PWR відзначаються стабільністю і гнучкістю, що дозволяє змінювати потужність у діапазоні 20–100% номіналу протягом 30 хвилин. У реакторах типу BWR (Boiling Water Reactor) [6] потужність регулюється зміною тиску пари та активності нейтронів у зоні кипіння. BWR складніші для маневрування, оскільки пароутворення безпосередньо відбувається в активній зоні. Сучасні системи цифрового управління, 'сірі' стрижні керування та моніторинг параметрів у реальному часі дозволяють безпечно і точно регулювання потужності обох типів реакторів.

5. ЕКОНОМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВИВЕДЕННЯ АЕС

Виведення АЕС у 2022–2023 роках відіграло роль у трансформації енергетичного балансу Німеччини. Короткострокові ефекти включали збільшення імпорту електроенергії, часткове зростання генерації з газу/вугілля у певні періоди та підвищення цін на енергію під час енергетичної кризи 2022–2023 років. Разом з тим, 2023 рік показав значне зниження викидів у порівнянні з 2022 роком переважно через скорочення використання вугілля і падіння промислового виробництва — складні багатобачкові ефекти, частина яких не пов'язана безпосередньо з політикою щодо ядерної енергетики.

6. ВПЛИВ МАНЕВРУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ ТА РЕСУРСИ ОБЛАДНАННЯ

Часте зміщення потужності впливає на термічні цикли, вібрації та механічне зношування компонентів турбін і тепловідільних систем.

Для зниження ризиків застосовують:

- оцінку залишкового ресурсу та збільшений моніторинг;
- адаптовані цикли технічного обслуговування;
- інвестиції у модернізацію матеріалів та конструкцій (паливні збірки, підшипники турбін, тощо).

7. ПЕРСПЕКТИВИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ УКРАЇНИ

Зараз Україна має три основні діючі АЕС — Південноукраїнську, Хмельницьку та Рівненську, де експлуатуються реактори типу WWER-1000 і WWER-440. Ці блоки потенційно здатні працювати у гнучкому режимі після модернізації систем керування, автоматизації процесів та вдосконалення паливних збірок. Рівненська АЕС може стати пілотною станцією для тестування маневрування, а Південноукраїнська — для масштабного впровадження технологій.

Необхідні кроки, це по-перше оновлення цифрових систем управління реактором, по-друге - впровадження адаптивних програм регулювання потужності та створення нормативної бази для офіційного використання АЕС у

балансуванні системи з розробкою економічних стимулів для операторів.

У перспективі гнучка робота АЕС може зменшити залежність України від імпорту електроенергії, покращити стійкість енергосистеми та сприяти інтеграції ВДЕ. Важливу роль відіграє міжнародна співпраця — зокрема, проекти з Holtec щодо SMR160 і модернізація українських АЕС у партнерстві з IAEA та EDF [8].

На основі німецького досвіду [7] можна рекомендувати:

1. оцінити потенціал гнучкої роботи існуючих енергоблоків та потребу у модернізації систем керування;
2. впровадити системи прогнозування ВДЕ та інтегровані рішення для балансування попиту й пропозиції;
3. проводити пілотні програми маневрування на окремих блоках з посиленням моніторингом впливу на ресурс;
4. розробити економічні механізми винагороди за надання послуг балансування (регульована генеруюча потужність).

8. ВИСНОВОК

Досвід Німеччини демонструє, що за наявності правил, модернізацій та інвестицій АЕС можуть надавати значні послуги з балансування мережі.

Однак політичні рішення щодо виведення та економічні умови визначають кінцевий вплив на енергетику та клімат. Для України корисним буде вибір збалансованої стратегії — поєднання модернізації існуючого обладнання, розвитку ВДЕ та розгортання систем зберігання та інтелектуального управління мережею.

Список літератури

- [1] ДП «НАЕК Енергоатом». Модернізація систем управління на українських АЕС. Звіт, 2024. <https://www.ueex.com.ua/files/ueex-management-report-2024.pdf?1758843638>
- [2] Міністерство енергетики України. Енергетична стратегія: вебсайт URL: <https://mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratchiya-0>
- [3] Режим маневрування: вебсайт енергоатом. URL: <https://www.uatom.org/2017/03/28/rezhym-manevruvannya-za-i-proty.html>
- [4] IAEA. Міжнародна смстема ядерної інформації: вебсайт URL <https://www.iaea.org/>
- [5] Агентство з ядерної енергії ОЕСР (NEA)/ URL: https://www.oecd-neo.org/jcms/tro_5705/about-us
- [6] World Nuclear Association/ URL : <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/BROKDORF>
- [7] World Nuclear Association. Nuclear Power in Germany. 2024. URL : <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany>
- [8] Енергоатом.: вебсайт: URL : <https://energoatom.com.ua>

ⁱ Робота виконана під керівництвом канд. техн. наук, доц. Світлани Барановської