УДК 620.9:621.039.566:620.97 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.2

Є. Б. АЛФІМОВ
магістр, консалтинг у сфері енергетики, дослідник, Ноксвіль, США
ORCID: 0009-0003-2832-041X

ІНТЕГРАЦІЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У ДИНАМІЧНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ВИСОКОЮ ЧАСТКОЮ ВДЕ ТА МЕТОДИ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю підвищення надійності та гнучкості енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітрових електростанцій (ВЕС), робота яких характеризується високою варіативністю та похибками прогнозування. Нестабільність виробітку ВДЕ створює потребу в додаткових балансуючих потужностях і резервних технологіях, що підвищує вартість електроенергії та ускладнює досягнення цілей низьковуглецевого розвитку. У цих умовах особливого значення набуває дослідження ролі малих модульних реакторів (ММР) як джерела, здатного поєднувати базову генерацію та гнучке оперативне регулювання.

Метою статті є формування науково-практичних засад інтеграції малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою відновлюваних джерел енергії, зокрема вітрових електростанцій, з огляду на особливості прогнозування виробітку та керування навантаженнями.

Методологія дослідження ґрунтується на системному аналізі технічних характеристик сучасних ММР, порівнянні їх маневрових можливостей із традиційними енергоблоками, використанні прогнозних моделей (day-ahead, intraday, nowcasting) та методів сценарного планування. Використано узагальнення досвіду міжнародних енергетичних організацій, аналітику національних лабораторій, а також результати моделювання гібридних енергосистем із синхронізацією ММР та ВДЕ.

Результати дослідження показали, що ММР здатні компенсувати короткострокові коливання виробітку ВЕС завдяки регулюванню потужності з градієнтом 2–5 % від номінальної на хвилину, зменшувати потребу у швидкодійних газотурбінних чи акумулюючих резервах, а також підвищувати коефіцієнт використання встановленої потужності енергосистеми на 10–15 %. Виявлено, що поєднання ММР із цифровими системами прогнозування та диспетчеризації забезпечує ефективну синхронізацію виробітку з добовими графіками попиту та скорочує потребу в аварійних резервах на 12–18 %.

Висновки засвідчують, що ММР здатні забезпечити надійну роботу енергосистем із високою часткою ВДЕ, зменшити дисбаланс, скоротити обсяги «скидів» відновлюваної генерації та знизити системні витрати. Виявлено проблеми, пов'язані з фізичними обмеженнями маневрових режимів, похибками прогнозування, браком уніфікованих стандартів та відсутністю економічних стимулів для гнучкої експлуатації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з оптимізацією паливного циклу ММР в умовах регулярних маневрів, розробленням ринкових механізмів винагороди за гнучкість, створенням єдиних стандартів експлуатації та моделюванням сценаріїв інтеграції ММР із ВДЕ в різних пропорціях для визначення їх ролі в майбутніх низьковуглецевих енергосистемах.

Ключові слова: *прогнозування генерації, балансування енергосистем, маневрові режими, цифрові двійники, енергетична гнучкість.*

I. B. ALFIMOV
Master's Degree, Consulting in the Field of Energy, Researcher, Knoxville, USA
ORCID: 0009-0003-2832-041X

INTEGRATION OF SMALL MODULAR REACTOR INTO DYNAMIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS WHICH INCORPORATES MULTIPLE RENEWABLE ENERGY GENERATION SOURCES AND LOAD MANAGEMENT METHODS

The relevance of this study is driven by the need to enhance the reliability and flexibility of power systems with a high share of renewable energy sources (RES), particularly wind power plants (WPP), whose operation is characterized by high variability and forecasting errors. The instability of RES output creates demand for additional balancing capacity and reserve technologies, which increases the cost of electricity and complicates the achievement of low-carbon development goals. Under these conditions, the role of small modular reactors (SMRs) becomes especially important as a source capable of combining baseload generation with flexible operational regulation.

The purpose of the article is to develop scientific and practical principles for integrating small modular reactors into dynamic power systems with a high share of renewable energy sources, particularly wind power plants, while accounting for the specific features of generation forecasting and load management.

© Алфімов Є. Б., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

The research methodology is based on a systematic analysis of the technical characteristics of modern SMRs, comparison of their load-following capabilities with conventional power units, application of forecasting models (day-ahead, intraday, nowcasting), and the use of scenario planning methods. The study draws upon the generalization of international energy organization experience, analyses of national laboratory reports, and results of modeling hybrid power systems synchronized with SMRs and RES.

The findings show that SMRs can compensate for short-term fluctuations in WPP output by regulating power with a gradient of 2–5 % of nominal capacity per minute, reduce the need for fast-response gas turbines or storage reserves, and increase the capacity utilization factor of the system by 10–15 %. The combination of SMRs with digital forecasting and dispatch systems ensures effective synchronization of generation with daily demand profiles and reduces the need for emergency reserves by 12–18 %.

The conclusions demonstrate that SMRs can ensure the reliable operation of power systems with a high share of RES, reduce imbalances, decrease renewable generation curtailment, and lower system costs. However, challenges were identified, including the physical limitations of load-following modes, forecasting errors, lack of unified standards, and absence of economic incentives for flexible operation.

Future research should focus on optimizing the SMR fuel cycle under regular load-following conditions, developing market mechanisms for flexibility rewards, creating unified operating standards, and modeling integration scenarios of SMRs with RES in varying proportions to determine their role in future low-carbon power systems.

Key words: *generation forecasting, power system balancing, load-following operation, digital twins, energy flexibility.*

Постановка проблеми

Інтеграція малих модульних реакторів (ММР) у сучасні енергосистеми постає як складна багаторівнева проблема, тісно пов'язана з пошуком нових рішень для забезпечення надійності та гнучкості електропостачання в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Висока варіативність виробітку вітрових електростанцій (ВЕС) унаслідок погодних коливань створює додаткові виклики для стабільності енергетичного балансу, що зумовлює потребу у впровадженні прогнозно-аналітичних моделей синхронізації графіків генерації та споживання. Використання аналітики метеорологічних даних у поєднанні з моделюванням добових графіків споживання дозволяє оптимізувати взаємодію ММР із відновлюваними джерелами, формуючи адаптивні стратегії балансування. Особливої уваги потребує швидкість і точність регулювання потужності, адже здатність ММР до гнучкого маневрування визначає їх ефективність у покритті пікових навантажень і компенсації нерівномірного надходження енергії з вітрових установок. Таким чином, проблема інтеграції ММР виходить за межі суто технічного завдання і безпосередньо пов'язана з важливими науковими пошуками у сфері прогнозування, управління навантаженнями та створення інтелектуальних енергосистем, а також з практичними потребами підвищення надійності та енергетичної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові дослідження підтверджують, що інтеграція ММР у динамічні енергосистеми з високою часткою відновлюваних джерел енергії є одним із ключових напрямів розвитку сучасної енергетики. Основні підходи охоплюють алгоритмічне управління, моделювання гібридних архітектур, матеріалознавчі аспекти безпеки та політико-економічні чинники впровадження.

У першому напрямі наукових праць увагу зосереджено на цифрових і логістичних методах, здатних підсилити функціональність енергосистем. Зокрема, О. Коростін (O. Korostin) [1] досліджує застосування технологій оброблення природної мови для вилучення даних у морській логістиці, що може бути використано для прогнозування навантажень і режимів роботи енергосистем. Той самий дослідник [2] аналізує можливості оптимізації транспортних маршрутів із застосуванням штучного інтелекту, наголошуючи на синхронізації енергетичних і транспортних потоків. М. Павловський (M. Pavlovskyi) [3] пропонує рішення щодо підвищення ефективності двигунів за допомогою біопалива, що демонструє потенціал у поєднанні з ММР для декарбонізації транспортно-енергетичного комплексу. Подальші дослідження мають бути присвячені створенню інтегрованих цифрових платформ, що синхронізуватимуть енергетичні та логістичні системи.

Другий напрям досліджень охоплює політико-правові аспекти. П. Хмеляж (P. Chmielarz) [4] аналізує медіацію в соціально-економічних процесах як інструмент урегулювання складних системних відносин, що релевантно для формування рамок упровадження ММР. У подальшій роботі цей дослідник [5] розглядає енергетичну безпеку Польщі через призму газових постачань і політичних рішень, демонструючи важливість диверсифікації джерел енергії. Ці праці окреслюють перспективи створення нормативних і правових механізмів, необхідних для ефективної інтеграції ММР у національні енергетичні стратегії.

Третій науковий напрям включає технічні характеристики та надійність. Б. Маринушкін [6] описує ключові конструктивні особливості ММР, підкреслюючи їх компактність і масштабованість. І. Г. Шараєвський, Т. С. Власенко, Л. Б. Зімін та співавтори [7] досліджують металофізичні проблеми зварних з'єднань корпусів реакторів, акцентуючи на довгостроковій надійності, що є критично важливим для експлуатації ММР. Подальші дослідження мають спрямовуватися на створення моделей прогнозування деградації матеріалів у маневрових режимах.

Четвертий напрям стосується інтеграційних моделей та керування навантаженнями. Д. Міхельсон (D. Michaelson) та Дж. Цзян (J. Jiang) [8] здійснюють огляд інтеграції ММР у мікромережі на основі ВДЕ, акцентуючи на потребі ефективного енергоменеджменту. Також Д. Міхельсон (D. Michaelson) і Дж. Цзян (J. Jiang) [9] аналізують перспективи балансування навантажень у IEEE Power and Energy Magazine. Г. А. Габар (H. A. Gabbar) та О. Л. А. Естевес (O. L. A. Esteves) [10] демонструють симуляцію в режимі «reactor-in-the-loop», що дозволяє оцінювати динаміку гібридних систем у реальному часі. Г. А. Абушама (H. A. S. Abushamah), О. Буріан (O. Burian), Д. Рей (D. Ray) та Р. Шкода (R. Škoda) [11] пропонують інтеграцію систем централізованого теплопостачання з ММР та циклами Ренкіна із застосуванням акумуляторів енергії. Ефективність використання ММР у поєднанні з тепловими мережами для комбінованого виробництва електроенергії та тепла доводять Б. Пудел (B. Poudel) і Р. Гокараджу (R. Gokaraju) [12]. Р. С. Ель-Емам (R. S. El-Emam) і М. Г. Субкі (M. H. Subki) [13] досліджують перспективи і перешкоди створення ядерно-відновлюваних синергій.

Своєю чергою К. К. Сімоглу (C. K. Simoglou), І. М. Кайсас (I. M. Kaissas) та П. Н. Біскас (P. N. Biskas) [14] оцінюють наслідки інтеграції ММР у сучасні мережі, звертаючи увагу на складність балансування та стабільність. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зорієнтувати на багаторівневе управління із застосуванням алгоритмів машинного навчання.

Узагальнення показує, що ММР можуть відіграти ключову роль у формуванні гнучких енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел. Вони забезпечують балансування та надійність у динамічних умовах і створюють основу для розвитку інтегрованих енергетично-логістичних інфраструктур. Подальші наукові пошуки мають зосередитися на вдосконаленні алгоритмів керування, довгостроковому аналізі матеріалів і створенні симуляційних платформ реального часу.

Попри значні досягнення у вивченні можливостей ММР, залишається нерозв'язаною низка проблем. Не досить досліджено умови їх інтеграції в сучасні енергосистеми з огляду на технічні обмеження та специфіку інфраструктури. Невизначеність прогнозів відновлюваної генерації, особливо вітрової, обмежує точність балансування та ускладнює синхронізацію з добовими графіками споживання. Бракує глибоких досліджень маневрових можливостей ММР у режимах швидкої компенсації коливань ВДЕ, тоді як нормативна база і стандарти гнучкої експлуатації залишаються фрагментарними. Крім того, маловивченими є аспекти інтеграції інтелектуальних систем керування навантаженнями, що могли б суттєво знизити системні ризики.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом аналізу технічних і організаційних умов використання ММР, вивчення їх взаємодії з вітровими електростанціями на основі прогнозних моделей та сценарного планування, а також оцінювання ефективності маневрових режимів у компенсації нестабільності. Особливу увагу приділено виявленню ключових проблем інтеграції та формуванню практичних рекомендацій щодо розвитку інтелектуальних методів керування, що дозволить не лише підвищити гнучкість енергосистем, але й створити основу для нових теоретико-методологічних підходів у цій сфері.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування науково-практичних підходів до інтеграції малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ, зокрема вітрових електростанцій, з огляду на специфіку прогнозування виробітку та регулювання навантажень.

Для досягнення поставленої мети передбачається розв'язання таких **завдань:**

1) дослідити умови і технологічні аспекти інтеграції малих модульних реакторів у гнучкі енергосистеми з урахуванням технічних обмежень і прогнозної невизначеності;

2) визначити особливості взаємодії ММР із вітровими електростанціями та проаналізувати можливості оперативного регулювання потужності для компенсації нестабільності генерації;

3) сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення ефективності синхронізації ММР з відновлюваними джерелами енергії та розвитку інтелектуального керування навантаженнями.

Викладення основного матеріалу дослідження

Використання ММР у сучасних системах електропостачання набуває особливого значення в умовах зростання частки ВДЕ та необхідності підтримання стабільності енергобалансу. Їх інтеграція вимагає врахування комплексу умов та технологічних аспектів, що визначають ефективність і надійність роботи енергосистеми. До ключових факторів належать технічна готовність інфраструктури, можливості швидкого регулювання потужності, взаємодія з прогнозними моделями вітрової генерації та адаптація до змін добового навантаження. Ці параметри визначають практичний потенціал ММР як гнучкого джерела базового та маневреного виробітку електроенергії (табл. 1).

Сучасні технічні доповіді МАГАТЕ свідчать, що ММР здатні здійснювати регулювання потужності з градієнтом 2–5 % від номінальної на хвилину в діапазоні приблизно від 20 % до 100 % встановленої потужності без порушення паливного циклу, що робить їх порівнянними або навіть кращими за газотурбінні установки у функції «load following» [15]. Це дозволяє покривати коливання, спричинені високою часткою ВДЕ, зокрема вітрових електростанцій, де прогнозована амплітуда коливань може досягати 40 % установленої потужності впродовж кількох годин.

Таблиця 1

Основні умови та технологічні аспекти інтеграції малих модульних реакторів у сучасні енергосистеми

Умова/аспект	Сутність	Практичне значення	Приклад застосування
Інфраструктурна готовність	Наявність мереж і підключень до системи	Забезпечення надійної інтеграції без додаткових великих витрат	Використання наявних мережевих вузлів у регіонах із дефіцитом потужності
Регулювання потужності	Швидке маневрування в діапазоні від базового до пікового навантаження	Балансування енергосистеми в режимі реального часу	Компенсація провалів генерації від ВЕС за різких змін погоди
Прогнозування генерації	Використання метеоаналітики та графіків споживання	Зменшення дисбалансу в системі	Синхронізація виробітку ММР із прогнозом роботи ВЕС
Технологічна безпека	Стійкість до аварійних режимів і надійність реакторних систем	Збереження стабільності мережі та енергобезпеки	Локалізована автономна робота в разі відмови ВДЕ
Гнучкість інтеграції	Масштабованість і модульність установок	Адаптація до потреб конкретних регіонів	Встановлення ММР у віддалених промислових зонах чи на островах

Джерело: сформовано автором на підставі [6, с. 278–280; 7, с. 5–10; 8; 13; 14]

За даними NREL, моделювання гібридних енергосистем показало, що включення ММР до складу відновлюваних комплексів знижує потребу у великих системах акумулювання енергії на 20–35 %, а коефіцієнт використання встановленої потужності енергосистеми підвищується на 10–15 % [16]. У доповідях OECD NEA зазначено, що гнучка ядерна генерація може надати до 200 ГВт регульованої потужності в глобальному масштабі до 2050 року, що суттєво впливає на забезпечення надійності та стійкості низьковуглецевих систем [17].

Таким чином, аспекти, відображені в таблиці 1, виходять за межі суто технічних характеристик і набувають стратегічного значення: швидке регулювання потужності забезпечує маневровість у реальному часі, прогнозна інтеграція дозволяє синхронізувати генерацію ММР із варіативною генерацією ВЕС, а гнучкість масштабування створює передумови для розширення їх ролі у формуванні стійких гібридних енергосистем. В умовах переходу до декарбонізованої економіки це дає змогу не лише підвищити надійність електропостачання, а й оптимізувати витрати на балансування та резерви потужності.

Сучасна інтеграція ММР із вітровими електростанціями ґрунтується на поєднанні стабільної ядерної генерації з високоволатильною потужністю від ВДЕ, що значною мірою залежить від погодних умов. Така взаємодія вимагає розроблення гнучких механізмів прогнозування та балансування, де ключову роль відіграє використання метеоаналітики для коротко- та середньострокового прогнозування виробітку ВЕС у поєднанні з аналізом добових графіків навантаження. ММР у цьому контексті виконують функцію адаптивного резерву, що забезпечує компенсацію дефіциту в разі падіння генерації ВЕС або, навпаки, зменшує власний виробіток у періоди пікового вітрового навантаження, зберігаючи стабільність мережі.

Визначення особливостей взаємодії ММР із вітровими електростанціями (ВЕС) ґрунтується на необхідності поєднання стабільної ядерної генерації та варіативної відновлюваної потужності. Найбільший виклик пов’язаний з високою залежністю виробітку ВЕС від погодних умов і потребою його синхронізації з добовими графіками споживання. У таких умовах важливу роль відіграє якість прогнозування, сценарне планування та здатність ММР до швидкого маневрування, що дозволяє мінімізувати дисбаланс та підвищити ефективність використання ВДЕ (табл. 2).

Таблиця 2

Механізми взаємодії малих модульних реакторів і вітрових електростанцій у контексті прогнозування генерації

Механізм	Характеристика	Кількісні параметри
Короткострокове прогнозування	Використання nowcasting-моделей з горизонтом 1–6 годин	Оновлення прогнозу кожні 5–15 хв
Добове балансування	Узгодження day-ahead прогнозів ВЕС і добових профілів попиту	Горизонт 6–36 годин; оновлення intra-day
Маневрування потужністю ММР	Швидке регулювання в діапазоні штатних градієнтів	2–5 % від номіналу за хвилину в межах 20–100 % потужності (залежно від проєкту)
Сценарне планування	Формування базового, оптимістичного і песимістичного сценаріїв	3–5 сценаріїв для кожного горизонту
Використання надлишкової енергії	Відведення профіциту в тепло- чи водневі процеси	Потужність відводу залежить від «вікон» ВЕС

Джерело: сформовано автором на підставі [9, с. 59–61; 10; 11; 18; 21]

Практичні результати підтверджують значення цих механізмів. За даними IEA Wind Task 36, впровадження ансамблевих підходів до прогнозування дозволяє істотно знизити похибку короткострокових прогнозів і забезпечити більш плавне балансування [18]. Аналітика NREL показує, що в гібридних енергосистемах за участю ММР знижується потреба в масштабних акумулюючих потужностях, а реактори можуть компенсувати падіння виробітку ВЕС протягом кількох хвилин [19]. Дослідження Європейської комісії (JRC) підтверджують, що інтеграція

добових прогнозів попиту та генерації ВЕС в єдині моделі балансування дозволяє підвищити стійкість системи навіть за 15 % похибки прогнозу [20]. Згідно з оновленими даними NREL щодо інтегрованих прогнозів сонячної, вітрової генерації та навантаження, використання надлишкової енергії ВЕС для водневої чи теплової генерації підвищує загальний коефіцієнт використання системи [21]. Окремі дослідження прогнозних похибок показують, що сценарне планування з кількома варіантами розвитку подій дає змогу скоротити використання аварійних резервів на 12–18 % [22]. Таким чином, взаємодія ММР і ВЕС перетворюється на системний інструмент гнучкої інтеграції ВДЕ в низьковуглецеві енергосистеми.

Оперативне регулювання потужності ММР нині розглядається не як допоміжна, а як інтегральна функція їх роботи в енергосистемах із високою часткою ВДЕ. Саме здатність до «load-following» і гнучких режимів маневрування визначає практичну цінність ММР як балансуючого ресурсу, який поєднує стабільність базового навантаження з гнучкістю швидкодійних резервів. Наукові дослідження і демонстраційні проєкти показують, що завдяки поєднанню реакторних, турбінних та системних інструментів такі установки можуть забезпечувати компенсацію нестабільності відновлюваної генерації, зменшувати потребу в газотурбінних чи акумулюючих резервах та стабілізувати мережу без втрати ефективності паливного циклу (табл. 3).

Таблиця 3

Основні режими та інструменти оперативного регулювання потужності ММР

Режим/інструмент	Характеристика	Системна функція
Добове «load-following»	Зміна потужності в широкому діапазоні відповідно до добового профілю	Покриття пікових навантажень
Ступінчасте мультимодульне керування	Чергова робота модулів із можливістю гарячого резерву	Швидке реагування на зміни ВДЕ
Турбінний байпас	Швидке скидання пари без негайної зміни реакторної потужності	Амортизація короткочасних коливань
Нетто-маневрування через відвід енергії	Перерозподіл між мережею і споживачами тепла/водню	Оптимізація профіциту/дефіциту
Участь в AGC (Automatic Generation Control)	Автоматична корекція потужності в межах проєктних обмежень	Первинне і вторинне регулювання частоти

Джерело: сформовано автором на підставі [15; 17; 19; 23; 27; 28]

Практичні випробування та досвід експлуатації підтверджують реалістичність цих режимів. У Франції експлуатація парку PWR демонструє добові цикли зниження потужності від 100 % до 20 % і повернення до номіналу двічі на добу менш ніж за 30 хвилин, із темпом маневрування 30–40 МВт/хв (~3 % Pn/хв), що дозволяє покривати піки навантаження і балансувати варіативну генерацію [23]. У випадку проєкту GEH BWRX-300 технічні характеристики передбачають маневрування в діапазоні 50–100 % потужності, з можливістю підвищення від 50 % до 100 % приблизно за 2 години, а також миттєве зниження віддачі за допомогою турбінного байпасу для демпфування коливань вітрової чи сонячної генерації [24].

Для мультимодульних систем, як-от NuScale VOYGR, застосовується ступінчасте керування: частина модулів працює в базовому режимі, тоді як інші утримуються в гарячому резерві. Це дозволяє реалізувати добові цикли «100 → 20 → 100 %» із темпами до ≈40 % Pn/год та виконувати швидкі кроки зміни на рівні 20 % від номінальної потужності за ≈10 хвилин, що еквівалентно компенсації дефіциту масштабу сотень мегават у межах години [25]. Додатковий інструмент – інтеграція з водневими і тепловими установками – забезпечує «нетто-маневрування»: надлишки електроенергії відводяться у водневий електроліз або теплові процеси, тоді як у разі дефіциту ММР спрямовують енергію назад у мережу. Демонстраційні розрахунки NuScale показують, що такий режим дозволяє стабілізувати профіль навантаження без перевантаження активної зони та зменшити циклічне навантаження на паливо [26].

Сучасні автоматизовані системи управління передбачають участь ММР в AGC (Automatic Generation Control), коли реактор автоматично реагує на зміни частоти мережі через невеликі коливання потужності в рамках проєктних обмежень. Це знижує потребу у швидкодійних газотурбінних резервах і дозволяє інтегрувати більші обсяги ВДЕ, не знижуючи надійність енергопостачання [27; 28]. У сукупності наведені приклади підтверджують, що сучасні ММР здатні виконувати роль не лише базового джерела, але й гнучкого балансуючого інструмента, що має стратегічне значення для побудови стійких низьковуглецевих енергосистем.

Підвищення ефективності синхронізації ММР із ВДЕ визначається комплексом проблем, які виходять за межі суто технічної сфери. Найбільш суттєвим є розрив між динамікою роботи ММР та швидкоплинними коливаннями генерації від сонячних і вітрових електростанцій. Незважаючи на здатність до режимів «load-following», маневрування реакторів обмежене теплогідравлічними та нейтронно-фізичними параметрами [6, с. 278–280; 7, с. 5–10; 8, с. 111638], що ускладнює компенсацію помилок прогнозування відновлюваної генерації, які в середньому сягають 10–15 % [8, с. 111638; 9, с. 59–61]. У таких умовах надмірне навантаження на маневрові цикли може призвести до прискореного зносу обладнання та зростання експлуатаційних витрат.

Іншою проблемою є недосконалість цифрової інфраструктури. Сучасні SCADA-системи не забезпечують достатньої інтеграції з прогнозними моделями, а використання методів машинного навчання для кореляції виробітку ММР

і ВДЕ ще перебуває на стадії апробації [10]. Відсутність адаптивних алгоритмів ускладнює синхронізацію добових і внутрішньодобових графіків, знижуючи ефективність балансування [11]. Ситуацію посилює нестача уніфікованих стандартів гнучкої експлуатації: більшість нормативів орієнтована на базову роботу реакторів і не встановлює допустимі параметри частоти й амплітуди маневрування [13]. Це створює правову та технічну невизначеність для операторів.

Суттєвим викликом є також відсутність економічних стимулів. Оператори систем передачі часто не компенсують витрати на додаткові режими навантаження, що стримує готовність власників ММР брати участь у балансуванні [13]. Паралельно недостатньо розвинені системи керування попитом: на практиці вони зводяться до локального згладжування піків, хоча для інтеграції ММР необхідні комплексні рішення із залученням технологій «розумних мереж», цифрових двійників та прогнозної аналітики.

Підвищення ефективності синхронізації ММР із ВДЕ потребує поєднання прогнозних, технічних та регуляторних рішень. Найважливішим завданням є адаптація прогнозування: ансамблеві моделі погоди та добові профілі попиту мають інтегруватися в багатогоризонтне планування роботи ММР з регулярним оновленням упродовж доби. Використання модельно-предиктивного керування з обмеженнями за градієнтами потужності та теплогідравлічними параметрами дозволяє знизити ризики надмірного циклювання і водночас забезпечити відповідність режимів реактора динаміці відновлюваної генерації.

З технічного боку пріоритетом є розподіл маневрових функцій між реакторним і турбінним контурами. Ступінчасте мультимодульне керування дозволяє швидко підхоплювати навантаження за допомогою гарячого резерву, тоді як турбінний байпас і відводи пари забезпечують демпфування коливань без різкої зміни нейтронної потужності. Додатковий ресурс гнучкості створює інтеграція керованих споживачів – електролізерів, теплових накопичувачів, опріснювальних установок, які здатні поглинати профіцит ВДЕ та звільняти електричну потужність у години дефіциту.

Цифрові інструменти мають розширюватися від традиційної SCADA до платформ з елементами штучного інтелекту й цифрових двійників, що дозволяють синхронізувати дані прогнозів, телеметрії та стану обладнання. Це відкриває шлях до адаптивного визначення «операційних конвертів» потужності та обґрунтованого включення ММР у сервіси регулювання частоти й напруги.

Нарешті, регуляторне середовище має створити стимули до гнучкої експлуатації. Тарифи й ринкові правила повинні враховувати додаткові витрати на маневрування та визнавати цінність «нетто-маневрування» через секторну інтеграцію. Стандартизація допустимих режимів load-following і участі ММР в автоматичному регулюванні стане основою для їх системного залучення в балансуючі процеси. Лише комплексна інтеграція прогнозних моделей, модульно-турбінних режимів, інтелектуальних систем керування та економічних стимулів дозволить повною мірою використати потенціал ММР у гнучких низьковуглецевих енергосистемах.

Висновки

У дослідженні встановлено, що ММР здатні поєднувати функції стабільної базової генерації та гнучкого балансування, компенсуючи нестабільність ВДЕ і покриваючи пікові навантаження. Їх можливість змінювати потужність у межах 2–5 % від номінальної за хвилину дозволяє зменшити залежність від швидкодійних резервів і систем акумулювання, водночас підвищуючи ефективність використання встановленої потужності енергосистеми.

Разом із тим окреслено низку ключових проблем, а саме: фізичні обмеження маневрування, значні похибки прогнозування відновлюваної генерації, що сягають 10–15 %, недостатня інтегрованість цифрових платформ для прогнозу і диспетчеризації, відсутність уніфікованих стандартів гнучкої експлуатації та слабкі економічні стимули для участі ММР у балансуванні.

Практичні рекомендації передбачають упровадження сценарних моделей прогнозування, використання цифрових двійників і систем штучного інтелекту для адаптивного керування, а також розроблення регламентованих режимів load-following у мережевих кодах. Перспективним напрямом є інтеграція ММР із водневими та тепловими технологіями, що дозволяє поглинати надлишки ВДЕ та зменшувати навантаження на реактор. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію паливного циклу під час регулярних маневрів, створення ринкових механізмів винагороди за надану гнучкість і моделювання сценаріїв спільної роботи ММР і ВДЕ у різних пропорціях.

Список використаної літератури

1. Korostin O. Application of NLP technologies for data extraction from text messages in maritime logistics. *The Scientific Heritage*. 2024. № 141. P. 42–45. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.12908100

2. Korostin O. Optimization of maritime transportation routes using artificial intelligence: analysis of opportunities and challenges. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2024. № 56. P. 31–38. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-03

3. Pavlovskyi M. The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds.) *Modern technologies in energy and transport*. (*Studies in Systems, Decision and Control*; Vol. 510). Cham: Springer, 2024. P. 37–47. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Chmielarz P. Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych. *Studia Politologica*. 2022. Vol. 370, № 28. P. 45–60. URL: https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1227519 (date of access: 08.03.2025).

5. Chmielarz P. Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi. *Rocznik Integracji Europejskiej*. 2023. № 17. P. 197–206. DOI: https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12

6. Маринушкін Б. Особливості малих модульних реакторів (ММР). *Universum*. 2024. № 9. С. 276–282. URL: https://archive.liga.science/index.php/universum/article/download/1115/1127 (дата звернення: 08.03.2025).

7. Шараєвський І. Г., Власенко Т. С., Зімін Л. Б., Носовський А. В., Фіалко Н. М., Шараєвський Г. І. Металофізичні проблеми надійності зварювальних з'єднань корпусів реакторів ВВЕР. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2022. № 3. С. 3–15. DOI: https://doi.org/10.31717/2311-8253.22.3.1

8. Michaelson D., Jiang J. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 152. Article 111638. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111638

9. Michaelson D., Jiang J. Integration of small modular reactors into renewable energy-based standalone microgrids: an energy management perspective. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2022. Vol. 20, № 2. P. 57–63. DOI: https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3134149

10. Gabbar H. A., Esteves O. L. A. Real-time simulation of a small modular reactor in-the-loop within nuclear-renewable hybrid energy systems. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 18. Article 6588. DOI: https://doi.org/10.3390/en15186588

11. Abushamah H. A. S., Burian O., Ray D., Škoda R. Integration of district heating systems with small modular reactors and organic Rankine cycle including energy storage: design and energy management optimization. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 322. Article 119138. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119138

12. Poudel B., Gokaraju R. Small modular reactor (SMR) based hybrid energy system for electricity & district heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2021. Vol. 36, № 4. P. 2794–2802. DOI: https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3079400

13. El-Emam R. S., Subki M. H. Small modular reactors for nuclear-renewable synergies: prospects and impediments. *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 45, № 11. P. 16995–17004. DOI: https://doi.org/10.1002/er.6838

14. Simoglou C. K., Kaissas I. M., Biskas P. N. Assessing the implications of integrating small modular reactors in modern power systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 10. Article 2578. DOI: https://doi.org/10.3390/en18102578

15. Non-baseload operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation. *IAEA: website*. 2018. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf (date of access: 08.09.2025).

16. Opportunities and challenges for nuclear-renewable hybrid energy systems: preprint. *NREL: website*. 2019. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/72004.pdf (date of access: 08.09.2025).

17. The role of flexible nuclear energy systems in a low-carbon energy future. *OECD NEA: website*. 2020. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_40641/the-role-of-flexible-nuclear-energy-systems-in-a-low-carbon-energy-future (date of access: 08.09.2025).

18. Recommended practice for the implementation of renewable energy forecasting solutions. Part 2 (2nd ed.). *IEA Wind Task 36: website*. 2022. URL: https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/05/IEAWind_Task36_Recommended_Practice_Part2_2nd_Edition_ExCo_ReviewVersion-1.pdf (date of access: 08.09.2025).

19. Hybrid energy systems: opportunities for coordinated research. *National Renewable Energy Laboratory (NREL): website*. 2021. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/77503.pdf (date of access: 08.09.2025).

20. The onshore wind potential of the EU and neighbouring countries (ENSPRESO 2). *Joint Research Centre (JRC), European Commission: website*. 2025. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139999/JRC139999_01.pdf (date of access: 08.09.2025).

21. Solar, wind, and load forecasting dataset for MISO, NYISO, and SPP. *National Renewable Energy Laboratory (NREL): вебсайт*. 2024. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/83828.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

22. Wind power forecasting error distributions. *National Renewable Energy Laboratory (NREL): вебсайт*. 2012. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/56130.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

23. Électricité de France: the contribution of French nuclear fleet to the flexibility of the electric system. *NICE Future: вебсайт*. 2020. URL: https://www.nice-future.org/docs/nicefuturelibraries/default-document-library/france.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

24. BWRX-300 fact sheet. *GE Vernova: вебсайт*. 2023. URL: https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-nuclear/global/en_US/documents/product-fact-sheets/GE%20Hitachi_BWRX-300%20Fact%20Sheet.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

25. NuScale small modular reactors – energy session presentation (PNWER Summit). *PNWER: вебсайт*. 2017. URL: https://www.pnwer.org/uploads/2/3/2/9/23295822/charles_mercinkiewicz-_energy_session.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

26. NuScale small modular reactor integration for hydrogen and ammonia production (WP-178373 Rev 1). *NuScale Power: вебсайт*. 2025. URL: https://www.nuscalepower.com/hubfs/Website/Files/Technical%20Publications/nuscale-small-modular-reactor-integration-for-hydrogen-and-ammonia-production.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

27. Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants. *OECD NEA: вебсайт*. 2021. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_62445/technical-and-economic-aspects-of-load-following-with-nuclear-power-plants (дата звернення: 04.09.2025).

28. Advanced load following control (ALFC) for PWRs. *Framatome: website*. 2019. URL: https://www.framatome.com/solutions-portfolio/docs/default-source/default-document-library/product-sheets/a0655-p-ge-g-en-0655-201901-advanced-load-following-control.pdf (date of access: 04.09.2025).

References

1. Korostin, O. (2024). Application of NLP technologies for data extraction from text messages in maritime logistics. *The Scientific Heritage, 141*, 42–45. https://doi.org/10.5281/zenodo.12908100

2. Korostin, O. (2024). Optimization of maritime transportation routes using artificial intelligence: Analysis of opportunities and challenges. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production, 56,* 31–38. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-03

3. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport. Studies in systems, decision and control* (Vol. 510, pp. 37–47). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Chmielarz, P. (2022). Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych [Problems of mediation in social and economic matters]. *Studia Politologica – Political Science Studies, 370(28),* 45–60. Retrieved from https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1227519 [in Polish].

5. Chmielarz, P. (2023). Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi [Analysis of the energy security of the Republic of Poland in the field of natural gas supplies in 2015–2021 in connection with political and legal actions]. *Rocznik Integracji Europejskiej – Yearbook of European Integration, 17,* 197–206. https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12 [in Polish].

6. Marynushkin, B. (2024). Osoblyvosti malykh modulnykh reaktoriv (MMR) [Features of small modular reactors (SMR)]. *Universum, 9,* 276–282. Retrieved from https://archive.liga.science/index.php/universum/article/download/1115/1127 [in Ukrainian].

7. Sharaievskyi, I. H., Vlasenko, T. S., Zimin, L. B., Nosovskyi, A. V., Fialko, N. M., & Sharaievskyi, H. I. (2022). Metalofizychni problemy nadiinosti zvariuvalnykh ziednan korpusiv reaktoriv VVER [Metallophysical problems of reliability of welded joints of VVER reactor vessels]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia – Nuclear Energy and the Environment, 3,* 3–15. https://doi.org/10.31717/2311-8253.22.3.1 [in Ukrainian].

8. Michaelson, D., & Jiang, J. (2021). Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152,* 111638. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111638

9. Michaelson, D., & Jiang, J. (2022). Integration of small modular reactors into renewable energy-based standalone microgrids: An energy management perspective. *IEEE Power and Energy Magazine, 20*(2), 57–63. https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3134149

10. Gabbar, H. A., & Esteves, O. L. A. (2022). Real-time simulation of a small modular reactor in-the-loop within nuclear-renewable hybrid energy systems. *Energies, 15*(18), 6588. https://doi.org/10.3390/en15186588

11. Abushamah, H. A. S., Burian, O., Ray, D., & Škoda, R. (2024). Integration of district heating systems with small modular reactors and organic Rankine cycle including energy storage: Design and energy management optimization. *Energy Conversion and Management, 322*, 119138. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119138

12. Poudel, B., & Gokaraju, R. (2021). Small modular reactor (SMR) based hybrid energy system for electricity & district heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 36*(4), 2794–2802. https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3079400

13. El-Emam, R. S., & Subki, M. H. (2021). Small modular reactors for nuclear-renewable synergies: Prospects and impediments. *International Journal of Energy Research, 45*(11), 16995–17004. https://doi.org/10.1002/er.6838

14. Simoglou, C. K., Kaissas, I. M., & Biskas, P. N. (2025). Assessing the implications of integrating small modular reactors in modern power systems. *Energies, 18*(10), 2578. https://doi.org/10.3390/en18102578

15. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2018). *Non-baseload operation in nuclear power plants: Load following and frequency control modes of flexible operation*. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf

16. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2012). *Wind power forecasting error distributions*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/56130.pdf

17. Pacific Northwest Economic Region (PNWER). (2017). *NuScale small modular reactors – Energy session presentation (PNWER Summit).* Retrieved from https://www.pnwer.org/uploads/2/3/2/9/23295822/charles_mercinkiewicz-_energy_session.pdf

18. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2019). *Opportunities and challenges for nuclear-renewable hybrid energy systems: Preprint*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/72004.pdf

19. Framatome. (2019). *Advanced load following control (ALFC) for PWRs*. Retrieved from https://www.framatome.com/solutions-portfolio/docs/default-source/default-document-library/product-sheets/a0655-p-ge-g-en-0655-201901-advanced-load-following-control.pdf

20. Électricité de France. (2020). *The contribution of French nuclear fleet to the flexibility of the electric system. NICE Future*. Retrieved from https://www.nice-future.org/docs/nicefuturelibraries/default-document-library/france.pdf

21. OECD NEA. (2020). *The role of flexible nuclear energy systems in a low-carbon energy future*. Retrieved from https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_40641/the-role-of-flexible-nuclear-energy-systems-in-a-low-carbon-energy-future

22. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2021). *Hybrid energy systems: Opportunities for coordinated research*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/77503.pdf

23. OECD NEA. (2021). *Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants*. Retrieved from https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_62445/technical-and-economic-aspects-of-load-following-with-nuclear-power-plants

24. IEA Wind Task 36. (2022). *Recommended practice for the implementation of renewable energy forecasting solutions. Part 2* (2nd ed.). Retrieved from https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/05/IEAWind_Task36_Recommended_Practice_Part2_2nd_Edition_ExCo_ReviewVersion-1.pdf

25. GE Vernova. (2023). *BWRX-300 fact sheet*. Retrieved from https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-nuclear/global/en_US/documents/product-fact-sheets/GE%20Hitachi_BWRX-300%20Fact%20Sheet.pdf

26. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024). *Solar, wind, and load forecasting dataset for MISO, NYISO, and SPP*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/83828.pdf

27. Joint Research Centre (JRC), European Commission. (2025). *The onshore wind potential of the EU and neighbouring countries (ENSPRESO 2)*. Retrieved from https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139999/JRC139999_01.pdf

28. NuScale Power. (2025). *NuScale small modular reactor integration for hydrogen and ammonia production (WP-178373 Rev 1)*. Retrieved from https://www.nuscalepower.com/hubfs/Website/Files/Technical%20Publications/nuscale-small-modular-reactor-integration-for-hydrogen-and-ammonia-production.pdf

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025