

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.039:621.311.24:621.548

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/18>

**Алфімов Є.Б.**

<https://orcid.org/0009-0003-2832-041X>

Інститут проблем математичних машин і систем  
Національної академії наук України

### ОПЕРАТИВНЕ МАНЕВРУВАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У ДОБОВОМУ БАЛАНСУВАННІ НА ФОНІ СОНЯЧНО-ВІТРОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Актуальність дослідження зумовлена зростанням частки сонячної та вітрової генерації у структурі електроенергетичних систем, що супроводжується підвищенням нерівномірності виробництва електроенергії та ускладненням підтримання балансу між генерацією й споживанням. У цих умовах особливого значення набуває пошук технологічних рішень, здатних забезпечувати стабільність роботи енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії (далі – ВДЕ). Одним із перспективних напрямів вважається використання малих модульних реакторів (далі – ММР) як елементу гнучкої низьковуглецевої генерації, здатної брати участь у процесах балансування потужності. Метою статті є обґрунтування можливості використання ММР для оперативного регулювання потужності та участі в добовому балансуванні електроенергетичних систем в умовах зростання частки сонячної та вітрової генерації. У процесі дослідження використано методи наукового узагальнення, порівняльного та системного аналізу, а також елементи енергетичного моделювання режимів роботи енергосистем. Досліджено сучасні наукові підходи до інтеграції ММР у структуру електроенергетичних систем, проаналізовано техніко-експлуатаційні особливості зміни їхньої потужності та оцінено можливість використання реакторних установок у режимах добового балансування енергосистеми. Визначено особливості інтеграції ММР у системи з високою часткою ВДЕ. Встановлено, що модульна структура реакторних установок, можливість регулювання потужності та застосування цифрових систем керування створюють передумови для використання таких реакторів у режимах оперативного маневрування. Доведено, що застосування ММР сприяє згладжуванню добових коливань сумарної генерації, компенсації зниження виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями та підвищенню стабільності функціонування енергосистеми. У висновках обґрунтовано доцільність використання ММР як елементу гнучкої низьковуглецевої генерації для балансування електроенергетичних систем із високою часткою ВДЕ. Встановлено, що поєднання стабільної атомної генерації зі змінною генерацією сонячних і вітрових електростанцій дозволяє підвищити надійність та передбачуваність режимів роботи енергосистем.

**Ключові слова:** енергосистема, регулювання навантаження, гнучкість генерації, гібридні енергетичні системи, стабільність енергопостачання, інтеграція відновлюваних джерел енергії, низьковуглецева енергетика.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах розвитку енергетики суттєво зростає частка ВДЕ, зокрема сонячної та вітрової генерації, виробництво електроенергії з яких характеризується значною добовою й сезонною нерівномірністю. Коливання потужності таких джерел створюють додаткові вимоги до гнучкості енергосистеми та ускладнюють підтримання балансу між виробни-

цтвом і споживанням електроенергії. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває пошук технологічних рішень, здатних забезпечити стабільність роботи енергосистеми в умовах зростання частки нестабільної генерації.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання ММР, конструктивні особливості яких передбачають підвищену



гнучкість режимів експлуатації порівняно з традиційними атомними енергоблоками. Завдяки можливості оперативної зміни рівня потужності такі реактори можуть брати участь у процесах добового балансування енергосистеми, компенсуючи коливання виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями. Водночас упровадження маневрових режимів роботи атомної генерації потребує комплексного наукового обґрунтування з урахуванням технічних, експлуатаційних і системних аспектів. З огляду на це, дослідження можливостей оперативного маневрування ММР у системі добового балансування електроенергетики має важливе наукове та практичне значення для підвищення надійності та гнучкості сучасних енергосистем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд сучасних досліджень дозволяє виокремити кілька взаємопов'язаних наукових підходів, що відображають еволюцію уявлень про роль ММР у системах із високою часткою змінної відновлюваної генерації. Значна частина досліджень зосереджена на системних питаннях інтеграції ММР у структуру енергосистем та визначенні їхньої ролі в стабілізації енергетичного балансу. Зокрема, Є. Алфімов обґрунтовує можливості інтеграції ММР у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ, зокрема сонячної й вітрової генерації, із застосуванням механізмів керування навантаженням та адаптації режимів роботи реакторів до змінної структури попиту й генерації електроенергії [1]. Оцінку економічних параметрів реакторних установок, перспективних для будівництва в Україні, здійснюють О. Дибач та співавтори, доводячи, що ММР можуть бути стабілізаційним елементом гібридних енергетичних систем, здатним компенсувати нестабільність генерації ВДЕ [2]. Розвиток децентралізованої енергетики та роль керованих джерел енергії в забезпеченні надійності енергопостачання аналізують А. Халатов та Н. Фіалко, підкреслюючи важливість поєднання різних типів генерації для підвищення гнучкості енергосистем [3]. Системи розподіленої генерації як основу формування децентралізованої енергетичної архітектури, у якій ММР можуть бути стабілізаційним джерелом керованої потужності поряд із ВДЕ, розглядають О. Винаков та О. Кетрарь [4].

Важливий пласт досліджень стосується інтеграції ММР у гібридні мікромережі та системи керування енергетичними потоками. Так, Д. Майклсон (D. Michaelson) та Дж. Цзян (J. Jiang) у своїй роботі здійснюють огляд інтеграції ММР у мікро-

мережі з ВДЕ, доводячи, що ММР можуть виконувати функцію стабілізаційного джерела базової потужності, яке згладжує коливання виробництва електроенергії сонячними та вітровими установками [5]. Багаторівневу модель оптимізації спільної роботи фотоелектричної генерації та ММР у гібридних мікромережах, що дозволяє підвищити ефективність балансування енергетичних систем за умов нестабільної генерації, пропонують Ю. Дуань та співавтори (Y. Duan et al.) [6]. Можливості моделювання роботи ММР у режимі реального часу у складі гібридних систем nuclear-renewable, що дозволяє аналізувати динамічну поведінку реактора під час змін генерації відновлюваних джерел, демонструють Г. Габбар (H. Gabbar) та О. Естевес (O. Esteves) [7]. Підходи до управління енергетичними потоками в автономних мікромережах із використанням ММР та ВДЕ досліджують у подальшій роботі Д. Майклсон (D. Michaelson) та Дж. Цзян (J. Jiang), підкреслюючи значення прогнозування навантаження й виробництва електроенергії для забезпечення стабільної роботи системи [8].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із визначенням ролі ММР у процесі глобального енергетичного переходу та формуванні низьковуглецевих енергетичних систем. Зокрема Е. Майкелідіс (E. Michaelides) та Д. Майкелідіс (D. Michaelides) аналізують перспективи використання ММР у системах із високою часткою відновлюваної енергетики та доводять, що вони можуть забезпечувати стабільність енергосистем у разі значних коливань виробництва електроенергії [9]. Перспективи застосування ММР у морському секторі досліджують С. Сенеммар та співавтори (S. Senemmar et al.), підкреслюючи їхню здатність забезпечувати стабільне енергопостачання в системах із високою варіативністю попиту [10]. Конструктивні та експлуатаційні обмеження ММР при їх інтеграції з фотоелектричною генерацією в локальних енергетичних системах досліджує колектив авторів на чолі із К. Йоші (K. Joshi et al.), наголошуючи на необхідності врахування теплогідравлічних характеристик реактора під час реалізації режимів маневрування [11].

Водночас значна частина наукових робіт присвячена дослідженню технічних параметрів гнучкої експлуатації ММР і розвитку гібридних енергетичних систем. Так, С. Чанг (C. Chang) та Г. Ояндо (H. Oyando) здійснюють систематичний огляд вимог до режимів слідкування за навантаженням ММР, визначаючи технічні параметри, що забезпечують їх гнучку експлуатацію

в змінних енергосистемах [12]. Гібридну енергетичну систему на основі ММР для виробництва електроенергії та теплопостачання досліджують Б. Пудел (B. Poudel) та Р. Гокараджу (R. Gokaraju), демонструючи можливості поєднання електричної й теплової генерації для підвищення гнучкості використання енергетичних ресурсів [13].

Попри активне дослідження проблем інтеграції ММР у сучасні енергосистеми, низка аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, обмежено досліджені техніко-експлуатаційні можливості маневрування потужністю ММР у режимах добового балансування енергосистем із високою часткою сонячної та вітрової генерації, а також питання узгодження таких режимів із вимогами ядерної безпеки й диспетчерського керування енергосистемою. Крім того, фрагментарно вивчено роль ММР у компенсації коливань генерації ВДЕ в умовах формування гібридних енергетичних систем.

Запропоноване дослідження спрямоване на усунення зазначених прогалин шляхом аналізу наукових підходів до інтеграції ММР в енергосистеми з високою часткою ВДЕ, дослідження техніко-експлуатаційних особливостей зміни їх потужності та оцінювання ролі ММР у компенсації коливань генерації сонячних і вітрових електростанцій. Також визначено науково-практичні проблеми маневрування реакторних установок і запропоновано рекомендації щодо їх використання для підвищення стабільності та надійності енергосистем.

**Постановка завдання.** Метою статті є обґрунтування можливості використання ММР для оперативного маневрування потужністю в процесі добового балансування енергосистеми в умовах зростання частки сонячної та вітрової генерації.

Завдання дослідження:

1) проаналізувати наукові підходи до інтеграції ММР в енергосистеми з високою часткою ВДЕ та дослідити особливості зміни їхньої потужності в режимах добового балансування;

2) оцінити роль ММР у компенсації коливань генерації сонячних і вітрових електростанцій та виявити проблеми безпечного й ефективного маневрування реакторних установок;

3) розробити рекомендації щодо застосування ММР у режимах оперативного маневрування для підвищення стабільності та надійності енергосистем.

**Виклад основного матеріалу.** У сучасних наукових дослідженнях інтеграція ММР розглядається як один з основних напрямів формування гнучких низьковуглецевих енергосистем.

Зростання частки сонячної й вітрової генерації, виробництво яких має виражену нерівномірність, потребує джерел енергії, здатних забезпечувати стабільність та балансування електроенергетичної системи. Завдяки модульній конструкції, відносно невеликій встановленій потужності та можливості регулювання режимів роботи ММР можуть інтегруватися у структуру енергосистем як стабілізаційний компонент генерації. У науковій літературі сформувалося кілька підходів до їх використання в системах із високою часткою ВДЕ. Основні з них узагальнено в таблиці 1.

Реалізація наведених підходів підтверджується сучасними дослідженнями міжнародних організацій та аналітичних центрів у сфері енергетики. У технічних оглядах Міжнародного агентства з атомної енергії зазначається, що ММР можуть інтегруватися в гібридні енергетичні системи разом із сонячними й вітровими електростанціями, забезпечуючи стабільну генерацію та підтримуючи баланс електроенергії в періоди різких коливань виробництва ВДЕ [14]. Зокрема, у рамках концепції гібридних енергетичних систем із поєднанням ядерної та відновлюваної енергетики передбачається використання атомних установок для базового виробництва електроенергії з можливістю часткового регулювання потужності, тоді як змінна частина навантаження компенсується сонячною та вітровою генерацією [15].

Аналітичні дослідження національних лабораторій також демонструють перспективність такого підходу. Зокрема, у моделях енергосистем, розроблених Національною лабораторією відновлюваної енергетики США (National Renewable Energy Laboratory, NREL), показано, що поєднання атомної й відновлюваної генерації дозволяє підвищити гнучкість енергосистеми та зменшити потребу в резервних потужностях на основі вичерпного палива [16]. У сценаріях енергетичного розвитку США до середини ХХІ століття атомна генерація, зокрема ММР, розглядається як важливий стабілізаційний компонент систем із високою часткою змінної відновлюваної генерації. Подібні висновки містяться і в аналітичних оглядах Міжнародного енергетичного агентства, де зазначається, що атомна енергетика може відігравати важливу роль у підтриманні стабільності електроенергетичних систем із високою часткою вітрової та сонячної генерації [17].

За оцінками міжнародних дослідницьких центрів, у довгостроковій перспективі ММР розглядаються як технологія, більш адаптована до майбутніх умов функціонування енергетичних

ринків, де зростатиме потреба в гнучкості генерації, модульності енергетичних установок та їх сумісності з ВДЕ. Аналітичні матеріали OECD Nuclear Energy Agency підкреслюють, що перспективні реакторні технології, зокрема ММР, здатні ефективно працювати в системах із високою часткою змінної генерації та можуть використовуватися не лише для виробництва електроенергії, але й для виробництва тепла або водню в інтегрованих енергетичних комплексах [18].

У сучасних енергосистемах техніко-експлуатаційні характеристики ММР набувають особливого значення через потребу поєднання стабільної атомної генерації з мінливою сонячною та вітровою генерацією. На відміну від традиційних енергоблоків великої потужності ММР проєктуються з урахуванням більшої гнучкості режимів роботи, що дає підстави розглядати їх як перспективний інструмент добового балансування електроенер-

гетичної системи [2, с. 27]. Основні техніко-експлуатаційні особливості такого маневрування узагальнено в таблиці 2.

Ці техніко-експлуатаційні характеристики безпосередньо пов'язані з конструктивними параметрами реакторних установок та алгоритмами керування їхньою потужністю. У сучасних проєктах ММР передбачено можливість роботи в режимі регулювання навантаження (load-following), тобто автоматизованої зміни теплової та електричної потужності реактора відповідно до коливань попиту в енергосистемі. На відміну від традиційних енергоблоків великої потужності, для яких характерні обмежені можливості маневрування, ММР проєктуються з урахуванням ширшого діапазону регулювання потужності й швидшої реакції систем керування. За даними технічних оглядів Міжнародного агентства з атомної енергії, у низці сучасних проєктів ММР передбачено можливість

Таблиця 1

### Сучасні підходи до інтеграції ММР в енергосистеми з високою часткою ВДЕ

Підхід	Основний зміст	Значення для функціонування енергосистеми
Базова низьковуглецева генерація	Використання ММР як стабільного джерела електроенергії, що забезпечує постійну генерацію незалежно від погодних умов	Підвищує надійність енергосистеми та компенсує періоди низької генерації сонячних і вітрових електростанцій
Маневрова атомна генерація	Застосування режимів регулювання потужності реакторів для компенсації коливань виробництва відновлюваної енергії	Забезпечує гнучкість енергосистеми та підтримання добового балансу електроенергії
Гібридні енергетичні комплекси	Поєднання ММР із сонячними та вітровими електростанціями в єдиній енергетичній інфраструктурі	Дозволяє оптимізувати структуру генерації й зменшити коливання сумарної потужності
Інтеграція з системами накопичення енергії	Використання акумуляторних або теплових систем зберігання енергії разом із ММР	Підвищує ефективність використання електроенергії та сприяє стабілізації режимів роботи енергосистеми
Децентралізовані енергетичні системи	Використання ММР у регіональних або локальних енергосистемах разом із ВДЕ	Сприяє розвитку розподіленої генерації та підвищує енергетичну безпеку регіонів

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 22; 2, с. 27; 4, с. 9; 5; 8, с. 60; 9]

Таблиця 2

### Техніко-експлуатаційні особливості зміни потужності ММР у процесі балансування електроенергетичної системи

Характеристика	Технічний зміст	Значення для балансування енергосистеми
Маневровість реакторної установки	Можливість регулювання теплової та електричної потужності реактора у визначених межах	Дозволяє адаптувати генерацію до добових змін попиту на електроенергію
Швидкість зміни потужності	Темп підвищення або зниження потужності реактора (rate of load following)	Забезпечує оперативну компенсацію коливань сонячної та вітрової генерації
Модульність реакторної установки	Використання кількох реакторних модулів меншої потужності на одному енергетичному майданчику	Дозволяє змінювати сумарну потужність шляхом поетапного підключення або відключення модулів
Системи автоматизованого керування	Використання цифрових систем контролю та керування реактором	Підвищує точність регулювання потужності та стабільність роботи енергосистеми
Пасивні системи безпеки	Використання природних фізичних процесів (конвекції, гравітації) для охолодження реактора	Забезпечує безпечну експлуатацію реактора в маневрових режимах роботи

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 24; 7; 8, с. 61; 11; 12; 13, с. 2798].

зміни потужності в діапазоні приблизно 20–100 % від номінальної потужності, що дозволяє реактору адаптуватися до змін графіка навантаження енергосистеми [19].

Технічна реалізація таких режимів забезпечується поєднанням кількох інженерних рішень. По-перше, використання цифрових систем керування та автоматизованого регулювання реактивності дозволяє швидко змінювати параметри роботи реактора без порушення теплогідролічної стабільності установки. По-друге, модульна архітектура станції передбачає розміщення кількох реакторних модулів на одному майданчику, що дає можливість змінювати сумарну потужність станції шляхом регулювання навантаження окремих модулів. Наприклад, станція з кількома реакторами потужністю 70–300 МВт кожен може працювати в різних комбінаціях навантаження, що значно спрощує адаптацію генерації до добових змін попиту на електроенергію.

Аналітичні дослідження національних лабораторій підтверджують, що саме такі технічні характеристики роблять ММР придатними для роботи в системах із високою часткою відновлюваної генерації. За сценаріями розвитку електроенергетики США, розробленими NREL, атомна генерація, зокрема ММР, розглядається як стабілізаційний компонент електроенергетичних систем зі значною часткою сонячної та вітрової генерації. У прогностичних моделях енергосистем до 2050 року передбачається збереження ролі великих атомних реакторів як базової генерації, тоді як ММР можуть використовуватися як додатковий гнучкий ресурс низьковуглецевої генерації, здатний компенсувати добові коливання виробництва електроенергії від відновлюваних джерел [20].

Зростання частки сонячної та вітрової генерації в електроенергетичних системах супроводжується значною нерівномірністю виробни-

цтва електроенергії, що ускладнює підтримання балансу між генерацією й споживанням. У цих умовах ММР розглядаються як один з інструментів компенсації змінної генерації ВДЕ [13, с. 2798]. Завдяки стабільності виробництва електроенергії та можливості регулювання потужності такі реактори можуть виконувати функції балансування енергосистеми впродовж добового циклу навантаження (табл. 3).

Роль ММР у компенсації змінної генерації ВДЕ проявляється насамперед у стабілізації добового балансу потужності енергосистеми. Для систем із високою часткою сонячної генерації характерна значна нерівномірність виробництва електроенергії: у середині дня генерація фотоелектричних станцій різко зростає, тоді як у вечірні години швидко зменшується [5]. У таких умовах атомна генерація може підтримувати стабільний базовий рівень виробництва електроенергії та компенсувати дефіцит потужності після зниження сонячної генерації. Поєднання стабільної атомної та змінної відновлюваної генерації дозволяє зменшити коливання сумарної потужності та підвищити передбачуваність режимів роботи енергосистеми. Додатковою перевагою є модульна структура таких реакторних установок, що дає змогу змінювати сумарну потужність станції шляхом регулювання навантаження окремих реакторних модулів. У періоди високої генерації відновлюваних джерел частина модулів може працювати зі зниженою потужністю, тоді як у години пікового споживання або зменшення виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями сумарна потужність станції збільшується [8, с. 61]. Таким чином, поєднання ММР із ВДЕ формує більш стабільний профіль генерації та сприяє підвищенню надійності функціонування електроенергетичної системи.

Для наочного пояснення ролі ММР у компенса-

Таблиця 3

**Функціональна роль ММР у компенсації коливань генерації сонячних та вітрових електростанцій**

Функція в енергосистемі	Технічний зміст	Практичне значення
Базова стабілізаційна генерація	Постійне виробництво електроенергії незалежно від погодних умов	Забезпечує стабільну частину генерації в системах із високою часткою ВДЕ
Компенсація добових коливань	Регулювання потужності реакторної установки впродовж доби	Дозволяє компенсувати зниження генерації сонячних електростанцій у вечірні години
Балансування змінної генерації	Підтримання балансу між виробництвом та споживанням електроенергії	Зменшує потребу в резервній генерації на вичерпаному паливі
Інтеграція з гібридними енергосистемами	Робота разом із сонячними, вітровими електростанціями та накопичувачами енергії	Підвищує гнучкість електроенергетичної системи
Зниження коливань сумарної генерації	Стабілізація загального обсягу виробництва електроенергії	Підвищує надійність функціонування енергосистеми

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 25; 5; 6; 8, с. 61; 11; 13, с. 2801]

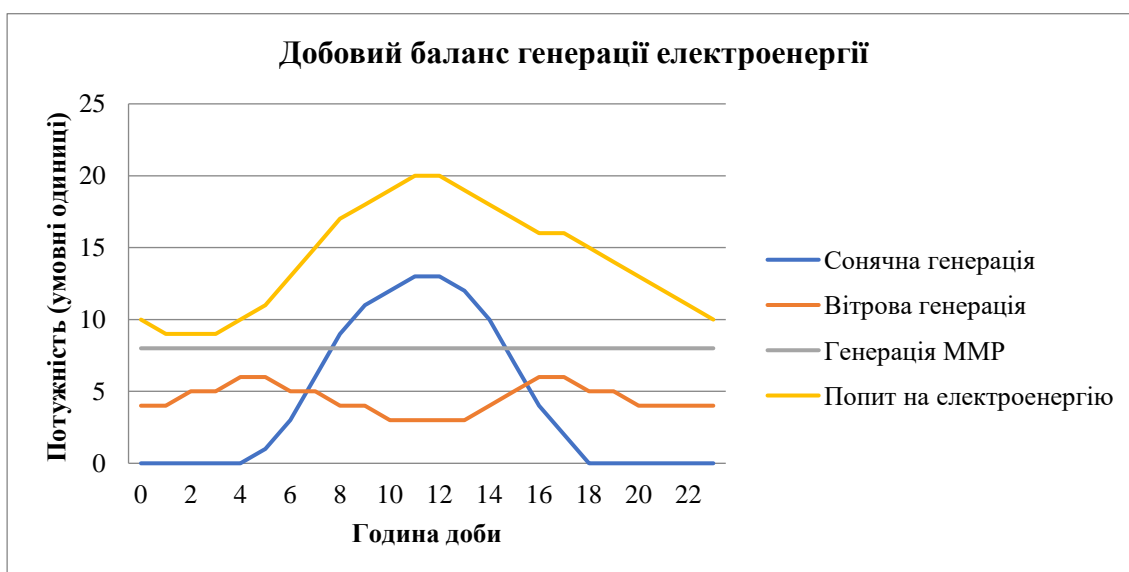
ції змінної генерації відновлюваних джерел енергії доцільно розглянути типовий добовий профіль виробництва електроенергії в енергосистемі. Значення, використані для побудови графіка, мають ілюстративний характер і відображають узагальнений режим роботи енергосистем зі значною часткою сонячної та вітрової генерації (рис. 1).

Як видно з рис. 1, у середині дня зростання сонячної генерації забезпечує значну частину виробництва електроенергії, тоді як атомна генерація підтримує стабільний базовий рівень потужності. У вечірні години, коли виробництво електроенергії фотоелектричними станціями різко зменшується, стабільна потужність ММР дозволяє компенсувати дефіцит генерації та згладити коливання сумарного виробництва електроенергії. Так, поєднання стабільної атомної генерації зі змінною генерацією відновлюваних джерел енергії сприяє формуванню більш збалансованого та передбачуваного режиму роботи електроенергетичної системи.

Зростання ролі ММР у структурі енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії актуалізує низку науково-практичних проблем, пов'язаних із забезпеченням безпечного та ефективного маневрування реакторних установок. Насамперед це стосується узгодження режимів зміни потужності реактора з вимогами ядерної та теплогідралічної безпеки, оскільки часті цикли регулювання навантаження можуть впливати на стабільність нейтронно-фізичних параметрів активної зони, температурні режими теплоносія

та ресурс основного обладнання [4, с. 9]. Додатковими проблемами є інтеграція атомної генерації в системи диспетчерського керування енергосистемою, забезпечення синхронної роботи з відновлюваними джерелами енергії та оптимізація режимів експлуатації реакторних модулів в умовах змінного попиту на електроенергію. Важливим аспектом також залишається розроблення економічно доцільних режимів маневрування, які не знижують ефективності роботи атомної електростанції та водночас дозволяють підтримувати стабільність енергосистеми.

У цих умовах підвищення ефективності використання ММР у процесі балансування електроенергетичних систем потребує формування відповідних організаційно-технічних підходів до їх експлуатації. Доцільним є впровадження алгоритмів прогнозування генерації ВДЕ та адаптивного планування режимів роботи реакторних модулів, що дозволить завчасно коригувати рівень атомної генерації відповідно до очікуваних змін виробництва електроенергії сонячними та вітровими електростанціями. Важливим напрямом є інтеграція атомної генерації з системами накопичення енергії та іншими елементами гнучкої генерації, що дає змогу зменшити амплітуду добових коливань потужності. Крім того, ефективність маневрових режимів може бути підвищена завдяки використанню модульної структури станції, яка дозволяє регулювати сумарну потужність шляхом зміни навантаження окремих реакторних модулів. Реалізація таких підходів сприятиме формуванню більш



**Рис. 1.** Добовий баланс генерації електроенергії сонячними, вітровими електростанціями та ММР

Джерело: сформовано автором на основі [5; 6; 8, с. 58; 9; 12]

гнучких і стійких електроенергетичних систем, у яких стабільна атомна генерація поєднується зі змінною генерацією відновлюваних джерел енергії та забезпечує надійність енергопостачання.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження встановлено, що зростання частки сонячної й вітрової генерації у структурі електроенергетичних систем призводить до посилення нерівномірності виробництва електроенергії та ускладнює підтримання балансу між генерацією і споживанням. У цих умовах ММР можуть розглядатися як один із перспективних елементів гнучкої низьковуглецевої генерації, здатної забезпечувати стабільність функціонування енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії. Встановлено, що інтеграція ММР у структуру енергосистем може реалізовуватися через використання їх як стабілізаційного компонента базової генерації, елемента маневрової атомної генерації та частини гібридних енергетичних систем. Доведено, що техніко-експлуатаційні характеристики ММР, зокрема модульність реакторних установок, можливість регулювання потужності та застосування цифрових систем керування, створюють передумови для їх використання в режимах добового балансування електроенер-

гетичної системи. Показано, що використання ММР дозволяє згладжувати коливання сумарної генерації, компенсувати зниження виробництва електроенергії сонячними й вітровими електростанціями та зменшувати потребу в резервній генерації на викопному паливі. Водночас встановлено, що застосування ММР у режимах маневрування супроводжується низкою науково-практичних проблем, пов'язаних із забезпеченням ядерної безпеки, впливом циклічних навантажень на ресурс обладнання та необхідністю інтеграції атомної генерації в системи диспетчерського керування енергосистемою.

Обґрунтовано, що підвищення ефективності використання ММР у процесі балансування енергосистем доцільно забезпечувати шляхом адаптивного планування режимів роботи реакторних модулів, використання прогнозування генерації відновлюваних джерел енергії та інтеграції атомної генерації з системами накопичення енергії.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням моделей взаємодії ММР та відновлюваних джерел енергії в гібридних енергетичних системах та розробленням оптимальних алгоритмів маневрування атомної генерації в умовах високої частки змінної генерації.

#### Список літератури:

1. Алфімов Є. Інтеграція малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ та методи керування навантаженням. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025. Т. 1, № 3 (94). С. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.2>
2. Дибач О. та ін. Оцінка економічних показників реакторних установок, перспективних для будівництва в Україні, та їх співставлення з відновлювальними джерелами енергії із застосуванням інструментарію МАГАТЕ. Ядерна та радіаційна безпека. 2023. Вип. 3, № 99. С. 16–30. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3\(99\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.3(99).02)
3. Халатов А., Фіалко Н. Газотурбінні та газопоршневі електростанції для децентралізованої енергетики України. Системні дослідження в енергетиці. 2025. Вип. 1, № 81. С. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004>
4. Винаков О. Ф., Кетрарь О. А. Пристрої та системи розподіленої генерації. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2023. Вип. 37, № 113. С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.37.113.2023.1>
5. 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>
6. Duan Y., Gao C., Huang Y., Luo Q., Xu Z. Coordinated operation and multi-layered optimization of hybrid photovoltaic-small modular reactor microgrids. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 40721. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24599-z>
7. 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>
8. 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>
9. Michaelides E. E., Michaelides D. N. Small modular reactors and the transition to renewable energy. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 441. Article 114207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114207>
10. Senemmar S., Jacob R. A., Badakhshan S., Rad A. M., Dowling M., Mukhi S., Zhang J. Navigating the future: Exploring small modular reactors in the maritime sector. *IEEE Electrification Magazine*. 2024. Vol. 12, № 4. P. 30–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/MELE.2024.3473190>

11. Joshi K., Poudel B., Gokaraju R. Investigating small modular reactor's design limits for its flexible operation with photovoltaic generation in microcommunities. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. 2021. Vol. 7, № 3. Article 031303. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4048896>
12. Chang C. K., Oyando H. C. Review of the requirements for load following of small modular reactors. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 17. Article 6327. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15176327>
13. 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>
14. Small Modular Reactors (SMRs). *International Atomic Energy Agency: вебсайт*. 2023. URL: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors> (дата звернення: 15.03.2026).
15. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Opportunities and Challenges. *International Atomic Energy Agency: вебсайт*. 2022. URL: <https://www.iaea.org/publications/15098/nuclear-renewable-hybrid-energy-systems> (дата звернення: 15.03.2026).
16. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Modeling and Analysis. *National Renewable Energy Laboratory: вебсайт*. 2020. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/77088.pdf> (дата звернення: 15.03.2026).
17. Nuclear Power in Clean Energy Systems. *International Energy Agency: вебсайт*. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system> (дата звернення: 15.03.2026).
18. Advanced Nuclear Reactor Systems and Future Energy Market Needs. OECD, 2021. URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/12/advanced-nuclear-reactor-systems-and-future-energy-market-needs\\_4f92e165/beb24009-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/12/advanced-nuclear-reactor-systems-and-future-energy-market-needs_4f92e165/beb24009-en.pdf) (дата звернення: 15.03.2026).
19. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. *International Atomic Energy Agency: вебсайт*. 2024. URL: <https://www.iaea.org/publications/15790/advances-in-small-modular-reactor-technology-developments> (дата звернення: 15.03.2026).
20. Gagnon P., Pham A., Cole W., Hamilton A. 2024 Standard Scenarios Report: A U.S. Electricity Sector Outlook. Technical Report. 2025. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy25osti/92256.pdf> (дата звернення: 15.03.2026).

#### **Alfimov Ye.B. OPERATIONAL MANEUVERING OF SMALL MODULAR REACTOR IN DAILY BALANCING UNDER HIGH SOLAR AND WIND GENERATION**

*The relevance of this study stems from the growing share of solar and wind power generation in the structure of electric power systems, which is accompanied by increased variability in electricity production and greater difficulty in maintaining a balance between generation and consumption. Under these conditions, the search for technological solutions capable of ensuring the stability of power systems with a high share of renewable energy sources (hereinafter referred to as RES) takes on particular importance. One promising direction is the use of small modular reactors (hereinafter referred to as SMRs) as an element of flexible, low-carbon generation capable of participating in power balancing processes. The purpose of this article is to justify the possibility of using SMRs for operational power regulation and participation in the daily balancing of power systems amid the growing share of solar and wind generation. The research employs methods of scientific generalization, comparative and systematic analysis, and elements of energy modeling of power system operating modes. Modern scientific approaches to integrating MMR into the structure of power systems were investigated, the technical and operational characteristics of changes in their power were analyzed, and the possibilities of using reactor units in daily power system balancing modes were assessed. The specific features of integrating MMRs into systems with a high share of RES have been identified. It has been established that the modular structure of reactor units, the ability to regulate power, and the use of digital control systems create the prerequisites for using such reactors in operational maneuvering modes. It has been demonstrated that the use of MMR contributes to smoothing daily fluctuations in total generation, compensating for reductions in electricity production by solar and wind power plants, and increasing the stability of the power system's operation. The conclusions justify the feasibility of using MMR as an element of flexible low-carbon generation for balancing power systems with a high share of RES. It has been established that combining stable nuclear generation with variable generation from solar and wind power plants allows for increased reliability and predictability of power system operating modes.*

**Keywords:** power system, load regulation, generation flexibility, hybrid energy systems, power system stability, renewable energy integration, low-carbon energy systems.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026