

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.019>

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МАЛОГО МОДУЛЬНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Є.В. Парус^{1*}, канд. техн. наук, І.В. Блінов^{1**}, докт. техн. наук, А.О. Костіков^{2***}, чл.-кор. НАН України

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України,
вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, Україна, 61046

e-mail: paruseugene@gmail.com, blinovigor81@gmail.com, kostikov@ipmach.kharkov.ua

Представлено математичну модель побудови оптимального графіка завантаження енергоагрегату з малим модульним ядерним реактором. Визначено основні умови функціонування малих модульних ядерних реакторів з конструктивними рішеннями, подібними до розробки NuScale, та представлено архітектуру математичної моделі пошуку оптимальних графіків їхнього функціонування. Визначено основні атрибути режимів функціонування малих модульних ядерних реакторів та математичну модель для імітації функції управління графіками функціонування реактора. Визначено основні складові для відображення результатів купівлі/продажу електроенергії енергогенеруючою компанією. Наведено цільову функцію максимізації вигоди від експлуатації малого модульного ядерного реактора та обмеження рентабельності його функціонування. Сформульовано основи методики використання моделі побудови оптимального добового графіка функціонування малого модульного ядерного реактора в задачах оцінки ефекту від будівництва та експлуатації таких реакторів на АЕС. Бібл. 15, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: малий модульний ядерний реактор, оптимізація, оцінка економічного ефекту, ринок «на добу наперед».

Вступ. Плани повоєнної відбудови та подальшого розвитку електроенергетики України передбачають впровадження джерел розосередженої генерації, передусім ВДЕ [1, 2]. Водночас у планах розвитку низьковуглецевих декарбонізованих технологій значна увага приділяється також розвитку атомної енергетики [3, 4]. Причому особливий актуальності останніми роками набувають плани децентралізації виробничих потужностей атомних електростанцій впровадженням малих модульних ядерних реакторів (ММР). Тематиці перспектив практичного впровадження технологій ММР присвячено багато публікацій, наприклад [5]. Зокрема в [6] досліджено перспективи та проблеми впровадження ММР в енергосистемах європейських країн. З огляду на запуск в останні кілька років у тестову і промислову експлуатацію перших зразків ММР актуальності набуває і задача оцінки перспектив будівництва та експлуатації міні-АЕС із ММР в ОЕС України. Так, робота [7] присвячена розв'язанню задачі оцінки економічного ефекту від застосування водневих технологій у системах зберігання електричної енергії на міні-АЕС із ММР. Проте основну увагу в [7] зосереджено на оцінці економічного ефекту від експлуатації системи виробництва/спалювання водню за припущення про вже сформований оптимальний графік функціонування ММР. Тому для оцінки інвестиційної привабливості проєктів будівництва та експлуатації міні-АЕС із ММР необхідно також розробити моделі формування оптимальних графіків завантаження ММР із урахуванням особливостей процесів ціноутворення в сегментах ринку електричної енергії України передусім у сегменті ринку «на добу наперед» (РДН).



Мета статті полягає в побудові моделі формування оптимального добового графіка функціонування малих модульних ядерних реакторів для продажу електроенергії на ринку електричної енергії України в задачі оцінки економічного ефекту від будівництва та експлуатації таких реакторів на міні-АЕС.

У складі енергоблоку міні-АЕС ММР фактично здійснює лише перетворення енергії розщеплення ядра в теплову енергію. Проте технічні характеристики енергоблоку міні-АЕС визначаються більшою мірою технічними можливостями ММР. Тому опис математичної моделі виконано з посиланням на значення технічних характеристик ММР. За потреби значення вхідних даних математичної моделі коригуються з урахуванням технічних характеристик іншого устаткування енергоблоку АЕС.

Умови функціонування малого модульного ядерного реактора. Для побудови математичної моделі враховано технічні характеристики ММР компанії NuScale [8]. Номінальна потужність реактора наразі становить 75 МВт. У межах публікації вважаємо, що вся потужність енергоблоку використовується для виробництва електричної енергії, теплофікаційний режим ММР не враховується.

Конструктивні рішення ММР у роботі [8] допускають процедури запуску та зупинки як нормальні режими функціонування установки. Водночас час введення в роботу та виведення в резерв енергоблоку становить приблизно 30 хвилин. Такі періоди зміни станів функціонування енергетичного блоку дають змогу оптимізувати добовий графік завантаження в частині відпуску електроенергії в години з найбільшими ринковими цінами та виведення з роботи в години з низькими ринковими цінами. З іншого боку, при побудові погодинних ставок пропозиції електричної енергії на торги РДН [9] необхідно враховувати час запуску й зупинки ММР на міні-АЕС, коли витрати на власні потреби збільшуються (порівняно з станами «в роботі» та «в резерві»), а потужність корисного відпуску електроенергії суттєво менша за номінальне значення.

Слід також враховувати, що паливні комірки ММР у [8] розраховані на експлуатацію не менше року. Тому при побудові графіка функціонування ММР на міні-АЕС протягом доби обсяг енергоресурсів для виробництва електричної енергії слід вважати невичерпним. Відповідно рішення про запуск ММР зумовлюється економічною доцільністю виробництва електричної енергії за прогнозованих ринкових цін в окремі години доби (оскільки на РДН України прийнятий розрахунковий період у 60 хвилин [10]). І навпаки, рішення про виведення

ММР з роботи зумовлюється збитковістю чи недостатньою рентабельністю виробництва електричної енергії за прогнозованих ринкових цін в окремі години доби.

Архітектура математичної моделі для розв'язання задачі побудови оптимального графіка функціонування ММР на міні-АЕС, у якій враховуються означені умови експлуатації, зображена на рис. 1.

Діаграма станів та переходів означає два основні стани – «в резерві» і «в роботі», а також переходи «запуск» і «зупинка». Для кожного із режимів експлуатації ММР визначаються технологічні і економічні характеристики. Технологічні

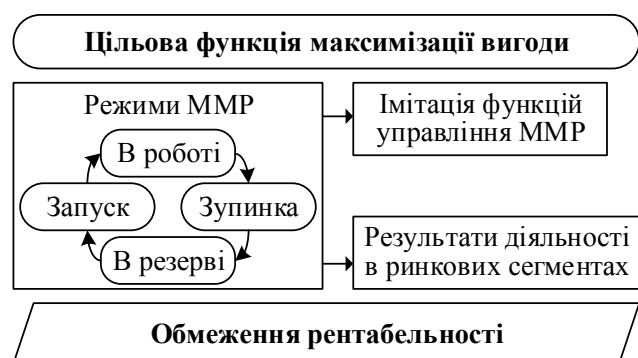


Рис. 1. Архітектура математичної моделі задачі побудови оптимального графіка експлуатації ММР

характеристики режимів експлуатації ММР використовуються процедурою імітації функцій управління при побудові добового графіка роботи ММР. Процедура імітації діяльності енергогенеруючої компанії в ринкових сегментах призначена для розрахунку витрат на закупівлю електричної енергії для покриття електроспоживання власних потреб у різних режимах ММР, а також для оцінки фінансових надходжень від продажу згенерованої електричної енергії.

Цільова функція максимізації вигоди визначає оптимальний час запуску ММР у роботу і зупинки в резерв, за яких вигода, як різниця між фінансовими надходженнями (від продажу електричної енергії) та витратами (на закупівлю електричної енергії для покриття електроспоживання власних потреб), найбільша. Водночас обмеження рентабельності визначає граничну мінімальну за добу суму вигоди від експлуатації ММР, за якої економічно доцільно здійснювати виробництво і продаж електричної енергії.

Розглянемо детальніше кожен з наведених складових математичної моделі побудови оптимального графіка функціонування ММР для виробництва й відпуску електричної енергії.

Атрибути режимів функціонування ММР. Для ідентифікації режимів функціонування ММР на міні-АЕС у межах окремої розрахункової години використовуються бінарні змінні $InWork_h$, $InBeg_h$ та $InEnd_h$. Для окремої години h значення бінарної змінної $InWork_h=1$ визначає функціонування ММР із номінальною потужністю завантаження, а значення $InWork_h=0$ – стан ММР «в резерві». Значення бінарної змінної $InBeg_h=1$ означає режим запуску ММР у розрахункову годину h , а значення бінарної змінної $InEnd_h=1$ означає режим зупинки ММР у розрахункову годину h .

Зазвичай реактори АЕС мають деякі обмежені можливості регулювання потужності в області номінального завантаження, які слід урахувати в задачах планування добових режимів роботи ММР. На етапі оцінки ефекту від будівництва та експлуатації міні-АЕС із ММР в умовах відсутності адекватної інформації про технологічні можливості енергоблоків достатньо обмежитися припущенням про функціонування енергоблоку з ММР із номінальною потужністю завантаження P_{nom} . На етапі проектування міні-АЕС із ММР, зважаючи на розрахункові технічні характеристики устаткування міні-АЕС, можливо враховувати зміну потужності ММР окремо як допоміжну послугу щодо балансування режимів ОЕС України. Для визначення часу функціонування ММР «в роботі» протягом розрахункової години введено додаткову змінну – кількість хвилин роботи ММР із номінальним завантаженням $t_{G,h}$. Тоді обсяг електричної енергії, відпущеної з енергоблоку міні-АЕС, за результатами оптимізації визначається як

$$W_{G,h} = \frac{1}{60} \cdot P_{nom} \cdot t_{G,h} : \forall h = [1..24],$$

де 60 – кількість хвилин у розрахунковій годині, (хв./год.); P_{nom} – номінальна потужність енергоблоку з ММР, (МВт); $t_{G,h}$ – змінна, кількість хвилин функціонування ММР із номінальним завантаженням у розрахункову годину h , (хв.).

Вхідні дані про характеристики ММР визначають оціночний час реалізації процедур запуску та зупинки (у межах математичної моделі вважається, що інше устаткування енергоблоку АЕС не впливає на ці періоди часу). Тоді область визначення часу функціонування ММР із номінальним завантаженням у розрахункову годину h знаходиться в межах

$$\begin{cases} t_{G,h} - InBeg_h \cdot t_B - InEnd_h \cdot t_E - 60 \cdot InWork_h \leq 0 \\ t_{G,h} \geq 0 \end{cases} : \forall h = [1..24],$$

де $InBeg_h$, $InEng_h$ – змінні оптимізації, атрибути режимів відповідно до запуску та зупинки ММР у розрахункову годину h (Boolean); t_B , t_E – час реалізації процедур відповідно до запуску та зупинки ММР, (хв.); $InWork_h$ – змінна оптимізації, атрибут функціонування ММР із номінальним завантаженням у розрахункову годину h , (Boolean).

Крім того, у математичній моделі передбачена можливість урахування обсягів корисного відпуску електричної енергії, відпущеної в режимах запуску і зупинки ММР. Тоді корисний відпуск електричної енергії від енергоблоку міні-АЕС у розрахункову годину h оцінюється за формулою:

$$V_{G,h} = W_{G,h} + W_B \cdot InBeg_h + W_E \cdot InEnd_h : \forall h = [1..24],$$

де W_B , W_E – корисний відпуск електричної енергії у режимах відповідно до запуску та зупинки ММР.

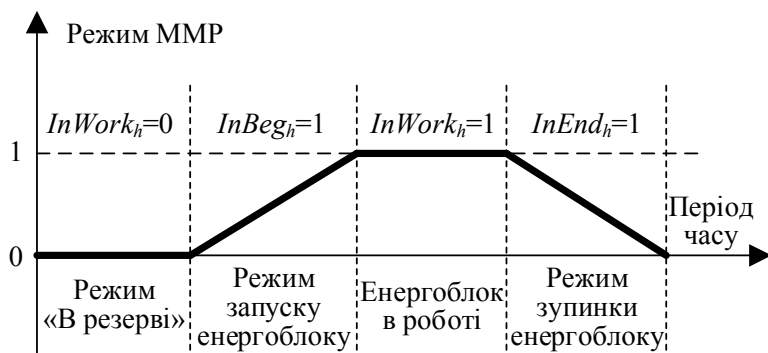


Рис. 2. Принцип протоколювання режиму ММР на кінець розрахункової години

Імітація функцій управління ММР. Використання в математичній моделі атрибутів режимів ММР як змінних зумовлює потребу в узгодженні режимів функціонування ММР у суміжні розрахункові години. З цією метою в математичній моделі ведеться протоколювання режимів у кінці розрахункової години з урахуванням режиму ММР, встановленого в кінці попередньої години за принципами, відображеними на рис. 2.

Для протоколювання змін у режимах роботи ММР на розрахункову годину використовуються значення атрибутів запуску (із додатнім знаком) та зупинки (із від'ємним знаком). Таким чином, область значень протоколу режимів роботи ММР обмежується множиною 0 «в резерві» та 1 «в роботі». Значення режиму функціонування ММР наприкінці розрахункової години h визначається за формулою:

$$M_h = M_{h-1} + InBeg_h - InEnd_h : \forall h = [1..24],$$

де M_{h-1} – режим функціонування ММР наприкінці попередньої розрахункової години ($h - 1$).

Вхідними даними визначається режим функціонування ММР на початок доби (тобто наприкінці попередньої доби) M_0 . Тоді режими функціонування ММР наприкінці кожної розрахункової години h розраховуються за формулою:

$$M_h = M_0 + \sum_{k=1}^h (InBeg_k - InEnd_k) : \forall h = [1..24],$$

де M_0 – режим функціонування ММР на початок доби; $InBeg_k$, $InEnd_k$ – змінні, значення атрибутів режимів відповідно до запуску та зупинки ММР у розрахункову годину k .

Для кожної розрахункової години h множина атрибутів $M_{(h-1)}$ (розраховується з використанням атрибутів за попередні розрахункові години), а також змінних $InWork_h$, $InBeg_h$ і $InEnd_h$ може набувати 16 варіантів значень, зведених у таблиці.

№	$M_{(h-1)}$	$InBeg_h$	$InEnd_h$	$InWork_h$	Допустимий
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	1
6	0	1	0	1	1
7	0	1	1	0	1
8	0	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	1	1
11	1	0	1	0	1
12	1	0	1	1	1
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	0
15	1	1	1	0	1
16	1	1	1	1	1

Шляхом експертних оцінок кожен із наведених у таблиці варіантів значень множини атрибутів режиму ММР оцінений на допустимість. Допустимі варіанти в таблиці відзначені числом 1 у колонці «Допустимий», а не допустимі – числом 0 та сірим фоном. Наприклад, для варіанту № 2 у таблиці атрибут недопустимості встановлено за порушення логіки побудови графіка завантаження ММР: недопустимо активізувати атрибут «в роботі» ($InWork_h=1$) за відсутності активованого режиму запуску ($InBeg_h$) у розрахунковій годині h чи у попередніх розрахункових годинах.

Для відсікання недопус-

тимих варіантів значень атрибутів режиму MMP розроблено систему обмежень:

$$\begin{cases} -20 \cdot M_{h-1} - 20 \cdot InBeg_h + 1 \cdot InEnd_h + 1 \cdot InWork_h \leq 0 \\ 2 \cdot M_{h-1} + 1 \cdot InBeg_h - 20 \cdot InEnd_h - 1 \cdot InWork_h \leq 1 \end{cases} : \forall h = [1..24],$$

Чисельні коефіцієнти системи обмежень підібрано емпірично.

Відображення результатів діяльності генеруючої компанії в ринкових сегментах.

Технологічні процеси експлуатації міні-АЕС із MMP забезпечуються діяльністю енергогенеруючої компанії на ринку електричної енергії. Зокрема, в ринкових сегментах енергогенеруюча компанія здійснює продаж згенерованої електричної енергії та закуповує електричну енергію для покриття електроспоживання власних потреб. Для оцінки ефекту від експлуатації електричної станції з MMP виконується імітація процедури закупівлі електричної енергії в електропостачальника для покриття електроспоживання власних потреб, а також процедури продажу згенерованої електричної енергії в ринкових сегментах.

Українське законодавство не накладає обмежень чи вимог обов'язковості на участь у торгівлі електричною енергією [11]. Тому відпущена електрична енергія може бути продана в організованих ринкових сегментах або за двосторонніми договорами. Крім того, енергогенеруюча компанія може самостійно продавати електричну енергію або делегувати цю функцію іншому учаснику ринку (електропостачальнику, енерготрейдеру чи стороні, відповідальній за баланс у балансуєчій групі). У межах математичної моделі розв'язання задачі оцінки ефекту від експлуатації MMP на міні-АЕС фінансові надходження від продажу згенерованої електричної енергії запропоновано визначати на основі цін у сегменті РДН. Основні складові ціни електричної енергії, за якою розраховуються фінансові надходження для енергогенеруючої компанії, формується з таких основних складових:

$$C_{\text{прод},h}^{\text{MMP}} = C_h^{\text{РДН}} - T^{\text{OP}} - T_{\text{П}}^{\text{ОСП}} - T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}} - T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}} : \forall h = [1..24], \quad (1)$$

де $C_h^{\text{РДН}}$ – прогнозована гранична ціна в сегменті РДН у годину h ; T^{OP} – тариф на послуги оператора ринку; $T_{\text{П}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині передачі електричної енергії; $T_{\text{ДУ}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині диспетчерського управління; $T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}}$ – маржа сторони, відповідальної за баланс, якій делеговано повноваження продажу електричної енергії.

Закупівля електричної енергії на покриття споживання власних потреб електростанції зазвичай виділяється в окрему процедуру, зокрема з метою зменшення суми платежів за небаланси. Дослідження окремих варіантів закупівлі електричної енергії на покриття електроспоживання власних потреб наведено в [12]. У межах математичної моделі розв'язання задачі оцінки ефекту від експлуатації MMP на міні-АЕС витрати на закупівлю електричної енергії для покриття електроспоживання власних потреб запропоновано визначати на основі цін у сегменті РДН:

$$C_{\text{куп},h}^{\text{MMP}} = C_h^{\text{РДН}} + T^{\text{OP}} + T_{\text{П}}^{\text{ОСП}} + T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}} : \forall h = [1..24], \quad (2)$$

де $C_h^{\text{РДН}}$ – прогнозована гранична ціна в сегменті РДН у годину h ; T^{OP} – тариф на послуги оператора ринку; $T_{\text{П}}^{\text{ОСП}}$ – тариф на послуги оператора системи передачі в частині передачі електричної енергії; $T_{\text{прод}}^{\text{СВБ}}$ – маржа сторони, відповідальної за баланс, якій делеговано повноваження закупівлі електричної енергії.

Вибір оптимальних схем закупівлі/продажу електричної енергії здійснюється як окрема задача за наведеними в [12, 13] методиками. Водночас наведена в публікації модель дає змогу оцінювати фінансові баланси енергогенеруючої компанії за результатами виробничої діяльності. У задачі оцінки ефекту від експлуатації MMP на міні-АЕС погодинні ціни продажу (1) та закупівлі (2) електричної енергії розраховуються на етапі підготовки даних до процедури оптимізації.

Функція максимізації вигоди від експлуатації ММР на міні-АЕС.

У математичній моделі використано цільову функцію вибору такого добового графіка функціонування ММР на міні-АЕС, за якого отримується максимум вигоди від згенерованої та проданої електричної енергії. Вигода в цільовій функції розраховується як різниця між фінансовими надходженнями та фінансовими витратами для генеруючої компанії. Фінансові надходження для енергогенеруючої компанії визначаються добутом ціни виручки від продажу електричної енергії (1) на обсяг корисного відпуску електричної енергії в різних режимах функціонування ММР, а саме в режимі запуску ММР, зупинки та завантаження на номінальну потужність. Розглянемо детальніше структуру витрат, пов'язаних із експлуатацією ММР на міні-АЕС.

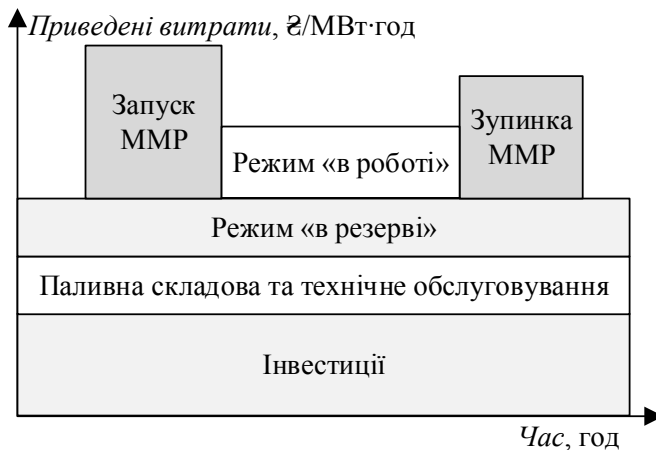


Рис. 3. Структура витрат, пов'язаних із експлуатацією ММР на АЕС

станції та змінну складову, яка залежить від рівнів завантаження генераторів електростанції [14]. До незмінної складової витрат у математичній моделі віднесені інвестиції у міні-АЕС та ММР, витрати на паливні комірки та технічне обслуговування електростанції. Крім того, до незмінної складової витрат віднесені витрати на підтримку стану готовності до запуску ММР. До змінної складової витрат віднесені додаткові витрати, які виникають у режимах запуску ММР, зупинки та функціонування з номінальним завантаженням.

Беззбиткова експлуатація ММР на міні-АЕС забезпечується повною компенсацією незмінної та змінної складових витрат фінансовими надходженнями від продажу електричної енергії:

$$Prof_D^{Sell} \geq Cost_D^{Const} + Cost_D^{Var},$$

де $Prof_D^{Sell}$ – сумарні за добу фінансові надходження від продажу електричної енергії, (€); $Cost_D^{Const}$ – незмінна складова витрат, пов'язаних з експлуатацією ММР на міні-АЕС, приведена до доби, (€); $Cost_D^{Var}$ – змінна складова витрат на реалізацію добового графіка завантаження ММР на міні-АЕС, (€).

Оскільки значення змінної складових витрат та фінансових надходжень безпосередньо залежать від сформованого за результатами оптимізації добового графіка завантаження ММР на АЕС, різниця цих значень використовується як ціль оптимізації. Незмінна складова витрат використовується як обмеження мінімального значення операційного прибутку [15] для забезпечення заданого рівня рентабельності [15]:

$$\begin{cases} \text{Max}(Prof_D^{EBIT}) = Prof_D^{Sell} - Cost_D^{Var} \\ Prof_D^{EBIT} \geq Cost_D^{Const} \end{cases} \quad (3)$$

Фінансові надходження від продажу електричної енергії, згенерованої за результатами реалізації добового графіка завантаження ММР на міні-АЕС, у канонічній формі (змінні оптимізації виділені потовщеним шрифтом):

$$Prof_D^{Sell} = \sum_{h=1}^{24} \left(C_{\text{прод},h}^{\text{ММР}} \cdot W_B \cdot \text{InBeg}_h + C_{\text{прод},h}^{\text{ММР}} \cdot W_E \cdot \text{InEnd}_h + C_{\text{прод},h}^{\text{ММР}} \cdot \frac{P_{\text{ном}} \cdot 1}{60} W_E \cdot t_{G,h} \right).$$

Змінна складова витрат, пов'язаних із реалізацією добового графіка завантаження ММР на міні-АЕС, у канонічній формі (змінні оптимізації виділені потовщеним шрифтом):

$$Cost_D^{Var} = \sum_{h=1}^{24} \left(C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_B^{MMP} \cdot InBeg_h + C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_E^{MMP} \cdot InEnd_h + C_{куп,h}^{MMP} \cdot \frac{\Delta W_G^{MMP}}{60} \cdot t_{G,h} \right),$$

де ΔW_B^{MMP} , ΔW_E^{MMP} – споживання власних потреб MMP у режимах відповідно до запуску та зупинки (МВт·год); ΔW_G^{MMP} – споживання власних потреб MMP за годину функціонування з номінальною потужністю завантаження (МВт·год).

Таким чином, цільова функція вигоди від реалізації добового графіка завантаження MMP на міні-АЕС у канонічній формі матиме вигляд:

$$Prof_D^{Sell} = \sum_{h=1}^{24} \left(\begin{aligned} & \left(C_{прод,h}^{MMP} \cdot W_B - C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_B^{MMP} \right) \cdot InBeg_h \\ & + \left(C_{прод,h}^{MMP} \cdot W_E - C_{куп,h}^{MMP} \cdot \Delta W_E^{MMP} \right) \cdot InEnd_h \\ & + \left(C_{прод,h}^{MMP} \cdot \frac{P_{nom} \cdot 1}{60} W_E - C_{куп,h}^{MMP} \cdot \frac{\Delta W_G^{MMP}}{60} \right) \cdot t_{G,h} \end{aligned} \right).$$

Приведене до доби значення постійної складової витрат оцінюється за формулою:

$$Cost_D^{Const} = \left(1 + \frac{R}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{365} \cdot \left(\frac{1}{N_{OK}} \cdot Inv^{MMP} + Cost_{Serv}^{MMP} \right) + C_{ГОТ}^{MMP} \right),$$

де R – планова норма рентабельності енергогенеруючої компанії, (%); 100 – коефіцієнт перерахунку процентів у відносні одиниці; 365 – кількість днів у році; N_{OK} – планова кількість років окупності енергоблоку із MMP; Inv^{MMP} – сума інвестицій в енергоблок міні-АЕС із MMP, (€); $Cost_{Serv}^{MMP}$ – річні витрати на обслуговування енергоблоку міні-АЕС із MMP, (€); $C_{ГОТ}^{MMP}$ – добові витрати на підтримку стану готовності MMP до запуску в роботу під завантаження з номінальною потужністю, (€).

Оцінка ефекту від експлуатації малого модульного ядерного реактора на міні-АЕС. Наведена в публікації математична модель імітує побудову оптимального добового графіка завантаження MMP на міні-АЕС. Для розв'язання задачі оцінки ефекту від експлуатації енергоблоку із MMP на міні-АЕС необхідно додатково враховувати сезонні коливання попиту на електричну енергію та відповідні коливання ринкових цін. Для цього достатньо обрати типові для окремих сезонів року (наприклад, зима, літо і весна/осінь) результати торгів РДН, ретроспективні значення яких публікуються на офіційному сайті Оператора ринку. За потреби додатково додається ретроспектива типових ринкових цін для врахування особливостей ціноутворення на РДН у вихідні та будні дні чи інших особливостей ціноутворення в різні сезони року. Результати розрахунків, отримані для кожного типового графіка погодинних ринкових цін, апроксимуються з метою визначення вигоди від експлуатації MMP на міні-АЕС за рік.

Розглянемо приклад побудови оптимального добового графіка завантаження MMP на міні-АЕС із використанням статистичної інформації про ринкові ціни за 19 лютого 2024 року. У розрахунках використано отримані на офіційному сайті НКРЕ КП чинні в цю добу тарифи на диспетчерське управління, передачу й розподіл (для ДТЕК Київські електромережі) електричної енергії. Інформацію про тарифи електропостачальника отримано на офіційному сайті Yasno для Києва. Інформацію про основні техніко-економічні характеристики MMP отримано на офіційному сайті NuScale Power та в інших відкритих джерелах інформації.

Сформований за результатами оптимізації добовий графік функціонування MMP на міні-АЕС відображений на рис. 4. З огляду на наявну інформацію про характеристики MMP NuScale та з урахуванням курсу на міжбанківській валютній біржі за 19 лютого 2024 року собівартість відпуску електроенергії оцінюється як 3 895 €/МВт·год. Тому для ринкових цін, що склалися на РДН для періоду реалізації угод 19 лютого 2024 року, рентабельність виробництва електричної енергії (ураховуючи витрати на запуск і зупинку MMP) забезпечувалася лише з 18:00 до 21:00 включно. Режим запуску MMP за результатами оптимізації визначено

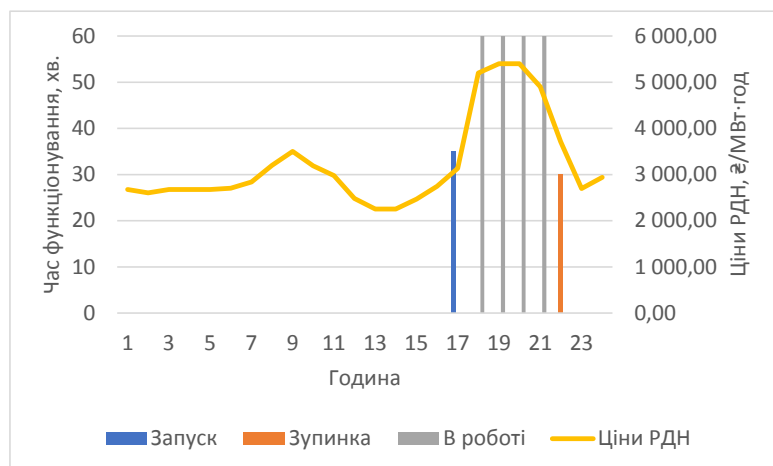


Рис. 4. Графік завантаження ММР NuScale з ринковими цінами на 19.02.2024

на кінець 20-ї години, а режим зупинки ММР – на початок 22-ї години. Експериментальні дослідження показали, що функціонування ММР додатково у 9-ту годину, коли ціна на РДН склала 3 299 €/МВт·год, економічно доцільне лише за собівартості відпуску електроенергії не більше 2 920 €/МВт·год.

Представлена у публікації математична модель визначає для окремих годин доби лише факт режимів запуску чи зупинки ММР, а також кількість хвилин роботи ММР із номінальним на-

вантаженням, чого достатньо при розв’язанні задачі оцінки економічного ефекту від експлуатації ММР на міні-АЕС. За потреби використання запропонованої математичної моделі в задачах планування режимів функціонування ММР на міні-АЕС не складно реалізувати додатково процедури розрахунку моментів початку режимів запуску й зупинки ММР за результатами оптимізації.

Висновки. Представлена в публікації математична модель дає змогу сформувати оптимальний за заданих ринкових цін добовий графік функціонування ММР на міні-АЕС при розв’язанні задачі оцінки економічного ефекту від експлуатації ММР. Реалізація розрахункових засобів на основі запропонованої математичної моделі надаватиме інструментарій для оцінки доцільності інвестування проєктів будівництва та експлуатації ММР на міні-АЕС. Крім того, запропонована математична модель придатна як основа для розробки засобів планування графіків завантаження ММР на міні-АЕС.

Роботу виконано в межах реалізації НДР за темою П-25-23 «Удосконалення та розробка основного обладнання турбоагрегатів енергоблоків АЕС, у тому числі з використанням технологій малих модульних реакторів та акумулювання енергії, з метою забезпечення енергетичної безпеки та стійкого розвитку економіки України у воєнний та повоєнний періоди», яка виконується в рамках бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230) на 2023–2024 роки за пріоритетним напрямом «Технології тепло-, електро- та атомної енергетики для забезпечення енергетичної безпеки України»

1. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>
2. Мокін, Б.І., Мокін О.Б., Шалагай Д.О. Перші два етапи системного аналізу плану відбудови енергетики України в напрямку інтеграції в неї відновлювальних джерел. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2: 42–48. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-42-48>
3. Кириленко О. В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. Доповідь на науковій сесії Загальних зборів НАН України 17 лютого 2022 року. *Вісник Національної Академії наук України*. 2022. № 3. С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018>
4. Коньшин В.І.; Квятковський Б.Б. Майбутнє атомної енергетики України з позиції розвитку низьковуглецевої економіки. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 2 С. 72. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279706>
5. Петрусь О., Кравченко,В., Погосов О., Земеров Е. Малі модульні реактори, перспективи та виклики для енергосистеми України. *Scientific Collection «InterConf»*. 2023. (184). С. 398–416. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/5113>
6. Nick Van Hee, Herbert Peremans, Philippe Nimmegeers. Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Volume 203. 114743. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743>
7. Парус Є.В., Блінов І.В., Костіков А.О. Оцінка вартості послуг добового регулювання електроспоживання неманевреними накопичувачами електричної енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. Вип. 65. С. 21. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.021>

8. Welter Kent, José N. Reyes Jr, and Adam Brigantic. Unique safety features and licensing requirements of the NuScale small modular reactor. *Frontiers in Energy Research*. 2023. No 11. P. 1160150.
9. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку. Постанова НКРЕКП № 308 від 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text> (дата звернення 04.10.2024).
10. Правила ринку. Постанова НКРЕКП № 307 від 14.03.2018.6. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (дата звернення 04.10.2024).
11. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення 04.10.2024).
12. Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В., Сичова В.В. Модель оцінки доцільності переходу промислових споживачів до погодинного обліку електричної енергії на роздрібному ринку. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 1. С. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242186>
13. Блінов І.В., Парус Є.В., Клименко О.Г., Ключко О.І. Спосіб порівняльних оцінок комерційних пропозицій електропостачальників для споживачів без погодинного обліку електричної енергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 3. С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289654>
14. Блінов І.В., Парус Є.В., Рибіна О.Б. Способи визначення плати електростанціям за готовність та фактичне надання послуг з первинного та вторинного регулювання частоти в Україні. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2012. № 33. С. 128–134.
15. Bodie Zvi; Kane Alex; Marcus Alan. *Essentials of Investments*. McGraw Hill. 2005. P. 452. ISBN 9780072510775.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF SMALL MODULAR NUCLEAR REACTOR ON THE ELECTRICITY MARKET

E.V. Parus¹, I.V. Blinov¹, A.O. Kostikov²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – Pidhornyi's Institute of Energy Machines and Systems of NAS of Ukraine, Pozhars'koho St., 2/10, Kharkiv, 61046, Ukraine

e-mail: paruseugene@gmail.com, blinovigor81@gmail.com, kostikov@ipmach.kharkov.ua

A mathematical model for constructing an optimal loading schedule of a power unit with a small modular nuclear reactor is presented. The main conditions of operation of small modular nuclear reactors with constructive solutions similar to the development of NuScale are determined, and the architecture of the mathematical model for the search of optimal schedules of their operation is presented. The main attributes of the operating modes of small modular nuclear reactors and a mathematical model for simulating the control functions of the reactor operation schedules have been determined. The main components for displaying the results of purchase-lease/sale of electricity by the power-generating company have been determined. The objective function of maximizing the benefit from the operation of a small modular nuclear reactor and limiting the profitability of its operation is given. The basics of the methodology of using the model for building the optimal daily schedule of the functioning of a small modular nuclear reactor in the tasks of assessing the effect of the construction and operation of such reactors at a nuclear power plant have been formulated. Ref. 15, fig. 4, table.

Keywords: small modular nuclear reactor, optimization, economic effect assessment, day-ahead market.

1. Kyrylenko O., Blinov I., Parus E., Trach I. Evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 4. Pp. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044> (Ukr)
2. Mokin B.I., Mokin O. B., Shalagai D. O. The First Two Stages of the Systemic Analysis of the Plan for the Reconstruction of Ukraine's Energy Sector Towards Integration of Renewable Sources. *Visnyk VPI*. 2023. No. 2. Pp. 42–48. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-42-48> (Ukr)
3. Kyrylenko O. (2022). Measures and ways of transforming Ukraine's energy sector into an intelligent environmentally friendly system. Report at the scientific session of the General Meeting of the NAS of Ukraine. *Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2022. No 3. Pp. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2022.03.018> (Ukr)
4. Valerij Konshin, Bohdan Kviatkovskiy. The future of atomic energy in ukraine from the position of the development of a low-carbon economy. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No 2 Pp. 72. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279706> (Ukr)
5. Petrys O., et al. Small modular reactors, prospects and challenges for the energy system of Ukraine. *Scientific Collection «InterConf»*. 2023. No 184. Pp. 398–416. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/5113> (Ukr)

6. Nick Van Hee, Herbert Peremans, Philippe Nimmegeers. Economic potential and barriers of small modular reactors in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 203. Pp. 114743. ISSN 1364–0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114743>
7. Parus Ye.I., Blinov I.V., Kostikov A.O. Estimation of the cost of services for daily regulation of electricity consumption by non-manoeuvrable electricity storage facilities. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2023. No. 65. Pp. 21. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.021> (Ukr)
8. Welter Kent, José N. Reyes Jr, and Adam Brigantic. Unique safety features and licensing requirements of the NuScale small modular reactor. *Frontiers in Energy Research*. 2023. No 11 P. 1160150.
9. Rules day-ahead market and intraday market: Decree NKREKP No 308 14.03.2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text> (revision 04.10.2024). (Ukr)
10. Rules of the market. Decree NKREKP No 307 14.03.2018.6. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (revision 04.10.2024). (Ukr)
11. On Electricity Market: The Law of Ukraine 13.04.2017 No 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (revision 04.10.2024). (Ukr)
12. Blinov I.V., Parus E.V., Miroshnyk, V.O., Shymaniuk P.V., Sychova V.V. Model of evaluation the feasibility of industrial customers to hourly accounting of retail electricity market. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2021. No. 1. Pp. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242186>
13. Blinov I., Parus E., Klymenko O., Kliuzko O. The method of comparative evaluations of commercial offers of electricity suppliers for consumers without hourly electricity metering. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 3 Pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289654>
14. Blinov I.V., Parus Ye.V., Rybina O.B. Methods of payment for power station for readiness and actual provision of services of primary and secondary frequency control in Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2012. No 33. Pp. 128–134.
15. Bodie Zvi; Kane Alex; Marcus Alan. *Essentials of Investments*. McGraw Hill. 2005. P. 452. ISBN 9780072510775.

Надійшла: 17.10.2024

Прийнята: 21.11.2024

Submitted: 17.10.2024

Accepted: 21.11.2024