

**М. І. СОТНИК, О. В. РАТУШНИЙ, С. О. ХОВАНСЬКИЙ,
Е. В. КОЛІСНІЧЕНКО, М. С. СВИНАРЕНКО**

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПРОЄКТНОЇ ПОТУЖНОСТІ МАЛОГО МОДУЛЬНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ УМОВ УКРАЇНИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ Й АПАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕННЯ ПЕРШОГО КОНТУРУ ОХОЛОДЖЕННЯ РЕАКТОРА

У статті на основі порівняльного аналізу світових концепцій малих модульних реакторів *NuScale*, *SMART* та *CAREM* визначено оптимальну проектну потужність українського малого модульного реактора (SMR) для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії. Запропоновано енергоблок електричною потужністю 55 МВт і тепловою потужністю 180 МВт на базі референтної для України технології *PWR/BBER*. Обґрунтовано вибір двопетлевої архітектури першого контуру з примусовою циркуляцією теплоносія (два головних циркуляційних насоса плюс резервний насос), що забезпечує високу надійність, маневреність та повну сумісність з існуючою українською інфраструктурою ТЕЦ і ТЕС. Проведено аналіз генерації електричної та теплової енергії у 23 великих містах України, наведено техніко-економічні показники проекту та терміни реалізації (8 років для першого, 4,5 року для наступних). Показано, що обрана концепція відповідає стратегічним завданням енергетичної безпеки України в поствоєнний період, сприяє децентралізації енергосистеми, декарбонізації та швидкому відновленню втрачених потужностей.

Ключові слова: малі модульні реактори, SMR, BBER, енергетична незалежність України, когенерація, перший контур охолодження, двопетлева схема, економічна ефективність.

М. SOTNYK, O. RATUSHYI, S. KHOVANSKYI, E. KOLISNICHENKO, M. SVYNARENKO DETERMINATION OF THE OPTIMAL DESIGN POWER OF SMR FOR THE CONDITIONS OF UKRAINE AND JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE METHOD AND HARDWARE DESIGN OF THE FIRST REACTOR COOLING CIRCUIT

The article presents a comparative analysis of the world's leading small modular reactor (SMR) concepts – NuScale, SMART, and CAREM – to determine the optimal design power of a Ukrainian SMR for combined electricity and heat production. Based on the analysis of energy generation and consumption patterns in 23 major Ukrainian cities, the authors propose a power unit with an electric capacity of 55 MW and a thermal capacity of 180 MW, developed on the basis of the VVER/PWR technology that is well-established and reference in Ukraine. The choice of a two-loop architecture for the primary cooling circuit with forced coolant circulation (2 main circulation pumps + 1 backup pump) is substantiated. This configuration ensures high reliability, operational flexibility, and full compatibility with the existing Ukrainian heat and power infrastructure of CHP and TPP plants. The study includes a detailed review of the technical characteristics and current status of the reference SMR projects, the project philosophy, operational principles, and economic indicators of the Ukrainian SMR. Implementation timelines are estimated at 8 years for the first unit and 4.5 years for follow-on units. The selected concept fully meets Ukraine's strategic needs for energy security in the post-war period. It enables decentralized deployment, rapid restoration of destroyed energy capacities, decarbonization of the energy sector, and integration with renewable sources. The proposed solution supports cogeneration, green hydrogen production, and flexible operation in hybrid energy systems, thereby significantly enhancing the resilience and sustainability of Ukraine's national energy system.

Key words: small modular reactors, SMR, PWR, energy independence of Ukraine, cogeneration, first cooling circuit, double-loop scheme, economic efficiency.

Вступ

Для забезпечення енергетичної незалежності України критично необхідний стабільний і безпечний виробіток електричної та теплової енергії, що є ключовою передумовою сталого промислового та економічного розвитку країни [1].

Зважаючи на сучасну геополітичну та енергетичну ситуацію у світі, багато держав протягом останніх років активно розробляють стратегії нарощування потужностей з виробництва електроенергії та тепла [2]. Особлива увага приділяється перспективній технології малих модульних реакторів (ММР) [3].

Зокрема, в Канаді компанія *Ontario Power Generation* отримала ліцензію на будівництво першого з чотирьох ММР типу BWRX-300 на майданчику *Darlington New Nuclear Project*. Станом на весну 2026 року на об'єкті триває активна фаза будівництва, а прогнозована вартість усього проекту переви-

щує 15 млрд. дол. США. Південна Корея та Сінгапур у березні 2026 року уклали меморандум про стратегічне партнерство у сфері розвитку та впровадження малих модульних реакторів [4].

Наразі у світі на різних стадіях реалізації перебуває понад 70 проєктів ММР [2]. Найсуттєвішого прогресу досягнуто в Китаї, де вже функціонує перший у світі ММР четвертого покоління з високотемпературним газовим охолодженням (HTR-PM). З грудня 2023 року установка працює в комерційному режимі на АЕС «Шидаовань» (провінція Шаньдун). Вона складається з двох модулів загальною електричною потужністю 210 МВт [3].

Другий китайський проєкт – ACP100 («*Linglong One*») – є першим у світі комерційним наземним малим модульним реактором на основі легководної технології, який пройшов оцінку безпеки МАГАТЕ. Реактор потужністю 125 МВт планується ввести в комерційну експлуатацію у першій половині 2026 року [5].



© М. І. Сотник, О. В. Ратушний, С. О. Хованський,
Е. В. Колісніченко, М. С. Свиначенко, 2026
Дослідницька стаття. Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією
Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)

Активно розвиваються проекти будівництва малих модульних реакторів у США та Великій Британії [6]. Високий рівень зацікавленості в розробці та впровадженні цієї технології демонструють також Бельгія, Франція та низка інших країн [7].

Отже, доцільно детально розглянути ключові особливості технології малих модульних реакторів та оцінити обґрунтованість і перспективи її застосування в умовах енергетичної системи України.

Мета роботи

Мета роботи полягає у визначенні технічно, економічно та стратегічно доцільних параметрів українського малого модульного реактора для комбінованого виробництва електричної й теплової енергії на основі порівняльного аналізу концепцій *NuScale*, *SMART* і *CAREM*, а також в обґрунтуванні вибору його проєктної потужності та компоновки першого контуру для умов України. Окремим завданням є перевірка придатності такої установки до інтеграції в існуючу інфраструктуру ТЕЦ і ТЕС та до поетапного розгортання в енергосистемі країни.

Виклад основного матеріалу

Малі модульні реактори являють собою ядерні реактори значно меншої потужності порівняно з традиційними великими енергоблоками атомних електростанцій [8]. Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) визначає ММР як реактори з електричною потужністю до 300 МВт на один блок [9]. Це становить приблизно третину від потужності багатьох сучасних реакторів великих АЕС. Для порівняння: два енергоблоки Хмельницької АЕС обладнані реакторами потужністю 1000 МВт кожен, три енергоблоки Південноукраїнської АЕС також мають реактори потужністю 1000 МВт кожен, а на Рівненській АЕС два блоки обладнані реакторами потужністю 1000 МВт і два – реакторами потужністю 440 МВт.

Серед ключових переваг ММР різних типів порівняно з класичними великими реакторами слід виділити підвищені показники ядерної безпеки завдяки широкому застосуванню пасивних систем безпеки, високу надійність, відносно короткі терміни виготовлення та будівництва за рахунок високої заводської готовності компонентів реакторної установки та допоміжних систем, а також спрощену логістику транспортування заводських модулів водним, залізничним та автомобільним транспортом безпосередньо на майданчик [3], [6] – [8].

Окремої уваги заслуговує маневреність ММР – можливість швидкої зміни потужності в широкому діапазоні (від 20 % до 100 % номінальної) [10]. Технологія також характеризується коротким часом виходу на номінальну потужність після запуску, відносно простою експлуатацією та значним проєктним терміном служби (80 – 100 років) [2] – [4].

Хоча ММР поступаються традиційним реакторам за одиничною потужністю, саме ця особливість є їхньою важливою перевагою, оскільки дозволяє формувати генерацію відповідно до локальних потреб у електроенергії та тепловій енергії [8]. Крім того, технологія передбачає можливість встановлення кількох модулів для нарощування загальної потужності [6]. Наприклад, для задоволення високого локального попиту можна розмістити чотири модулі по 55 МВт електричної потужності, отримавши загальну потужність 220 МВт. Для невеликих міст або забезпечення потреб великих промислових підприємств такої потужності часто виявляється достатньо.

ММР відкривають можливості поступового нарощування потужності енергосистеми. Висока маневреність установок з ММР робить їх особливо цінними для компенсації пікових навантажень в енергосистемі [3], [10].

Терміни реалізації проєктів ММР залежать від типу реактора, місця розташування, тривалості процедур ліцензування та постачання обладнання [7]. Зокрема, будівництво ММР типу BWRX-300 компанії *GE-Hitachi* планується завершити протягом 2 – 3 років [3]. Більшість інших розробників заявляють про аналогічні строки, що значно коротше порівняно з будівництвом традиційних великих реакторів.

В Україні накопичено значний досвід будівництва та експлуатації потужних АЕС з реакторами ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 [1]. З урахуванням усіх етапів термін від початку робіт до введення в експлуатацію першого блоку традиційної АЕС становить у середньому 8 – 10 років, а наступних блоків – 5 – 6 років. За оптимістичними оцінками розробників, один модуль ММР можна спорудити за 1 – 2 роки. Однак ці оцінки не враховують робіт нульового циклу, інженерної підготовки майданчика, мобілізації персоналу, пусконаладжувальних робіт та заходів фізичного захисту.

З огляду на український досвід спорудження АЕС, повний цикл – від ініціювання проєкту до введення в експлуатацію першого енергоблоку з ММР (за умови своєчасного виготовлення та постачання обладнання) – може оптимістично становити 3 – 4 роки [7].

Після завершення війни пріоритетним напрямом має стати відновлення втрачених генеруючих потужностей, особливо теплових електростанцій і теплоелектроцентралей у різних регіонах країни. Враховуючи наявну інфраструктуру, кваліфікований персонал, можливість видачі потужності в енергосистему та системи теплопостачання міст, заміна або модернізація таких об'єктів з використанням технології ММР видається одним із найбільш доцільних рішень. При цьому одночасно вирішується завдання декарбонізації енергетики [1], [8].

Міністерство енергетики України за підтримки Сполучених Штатів Америки розпочало роботу щодо впровадження проєктів ММР. У листопаді 2024 року Україна та США офіційно оголосили про

старт співпраці в межах програми *FIRST* для впровадження передових ядерно-енергетичних технологій. У рамках проєкту «*Phoenix*» («Фенікс») передбачається конверсія вугільних ТЕС на електростанції на базі малих модульних реакторів.

Для успішного впровадження технології ММР в Україні необхідно створити відповідну законодавчу та нормативно-правову базу, розробити порядок інтеграції АЕС з ММР (на базі майданчиків колишніх ТЕС і ТЕЦ) до Об'єднаної енергосистеми України, провести оцінку економічної доцільності проєктів та вирішити низку технічних питань. Важливим кроком є схвалення державою стратегії запровадження АЕС з ММР у контексті оновлення «Стратегії розвитку енергетики України до 2050 року».

Майбутній енергетичний комплекс України має становити збалансовану сукупність сучасних великих АЕС, малих АЕС на базі технологій ММР, гідроелектростанцій, відновлювальних джерел енергії та систем накопичення енергії.

Для розвитку сектору ММР в Україні доцільно обрати референтний тип ядерної установки. Це забезпечить високий рівень уніфікації, суттєво знизить витрати та скоротить терміни будівництва. У межах дослідницького проєкту Міністерства освіти і науки України № 0126U000865 «Розроблення головного циркуляційного насоса і парогенератора для малого модульного реактора (SMR)» проведено порівняльний аналіз світових концепцій (*NuScale*, *SMART*, *CAREM*) [11], [12], здійснено аналіз генерації та споживання енергії в містах і регіонах України, а також виконано техніко-економічну оцінку. За результатами аналізу як оптимальну та референтну технологію для українського енергоблоку ММР обрано установку електричною потужністю 55 МВт і тепловою потужністю 180 МВт.

Розглянемо проєкт ММР, що пропонує американська компанія *NuScale Power*, а саме *Power Module (NPM)* – це передовий малий модульний реактор із водою під тиском. Це перший проєкт ММР, який отримав сертифікацію Комісії з ядерного регулювання США (*NRC*). Модулі потужністю 50 – 77 МВт можуть об'єднуватися в установки до 924 МВт, пропонуючи підвищену безпеку та заводське виробництво.

Основні характеристики та статус проєкту компанії *NuScale Power*:

1) Технологія: Легководний реактор інтегрального типу (реактор, парогенератори та компенсатор тиску знаходяться в одному корпусі).

2) Модульність: Станція може містити від 1 до 12 модулів, що дозволяє масштабувати потужність.

3) Безпека: У разі аварії система може безпечно заглушити реактор без втручання оператора або зовнішнього живлення.

4) Статус: Проєкт пройшов сертифікацію та знаходиться на шляху до реалізації першого комерційного проєкту у США.

АТ «НАЕК «Енергоатом» активно співпрацює з компанією *NuScale Power*. У 2021 – 2023 роках сторони підписали меморандуми про наміри будівництва ММР в Україні, а також провели технічні семінари з проєктування, що потенційно може прискорити впровадження цієї технології в майбутньому.

Далі розглянемо проєкт ММР, розроблений Південнокорейським науково-дослідним інститутом атомної енергії (*KAERI*), а саме проєкт *SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)* – це проєкт малого модульного реактора, що забезпечує електричну потужність 100 МВт та теплову потужність 330 МВт. Він розроблений для виробництва електроенергії, опріснення води та опалення. *SMART* – перший у світі ММР, який отримав стандартне сертифікаційне схвалення регулятора (перше у 2012 р., оновлений *SMART100* у 2024 р.).

Основні характеристики та статус проєкту *SMART SMR*:

1) Технологія: Інтегральний реактор з водою під тиском.

2) Модульність: Станція може містити декілька модулів, що дозволяє масштабувати потужність.

3) Безпека: Підвищена безпека. Використовує пасивні системи безпеки, які працюють без втручання оператора або зовнішнього живлення.

4) Статус: Проєкт пройшов сертифікацію. Розглядається як універсальний реактор для енергопостачання та промислових потреб. Активно розробляється та вдосконалюється. Південна Корея активно співпрацює з Саудівською Аравією та Канадою для комерціалізації та розгортання цих реакторів на міжнародному ринку.

Наступним розглянемо аргентинський проєкт ММР *CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares)*. Це невеликий модульний реактор для виробництва електроенергії, який будується з 2014 року поблизу міста Сарате, у північній частині провінції Буенос-Айрес, поруч з атомною електростанцією Атуча I.

Прототип енергоблоку *CAREM-25* електричною потужністю 25 – 32 МВт – це перший в Аргентині вітчизняний атомний енергоблок, вартість якого оцінюється в 446 – 700 мільйонів доларів США. Принаймні 70% компонентів та супутніх послуг для *CAREM-25* мають бути закуплені у аргентинських компаній. Комерційна модель, яку *CNEA* зрештою передбачає як основу багатореакторної установки, матиме вищу потужність – від 100 до 120 МВт. Будівництво демонстраційного енергоблоку *CAREM-25* у Сарате триває з 2014 року, але проєкт супроводжується затримками, фінансовими проблемами та призупиненнями. Метою є введення в експлуатацію прототипу до кінця 2027 року, з планами на майбутні комерційні блоки потужністю до 300 МВт.

Основні характеристики та статус проєкту

CAREM:

1) Технологія: Легководний водо-водяний реактор під тиском (PWR) з пасивною системою безпеки та інтегральним компонованням (парогенератори розміщені всередині корпусу).

2) Модульність: Станція може містити декілька модулів, що дозволяє масштабувати потужність.

3) Безпека: Розроблений для використання природної циркуляції теплоносія, що підвищує безпеку.

4) Статус: У 2024 році було анонсовано завершення цивільних робіт та проведення критичного аналізу проекту (*Critical Design Review*). Мета проекту – створити конкурентоспроможний на світовому ринку ММР та забезпечити енергетичну незалежність Аргентини.

Зважаючи на те, що у світі на різних стадіях реалізації перебуває понад 70 проєктів малих модульних реакторів, які базуються на різних технологічних рішеннях, у межах даного дослідження не проводився всебічний аналіз усіх існуючих концепцій. Натомість увагу було зосереджено виключно на тих проєктах, які ґрунтуються на найбільш прийнятних для України референтних технологіях, мають високий ступінь технологічної готовності та реальний прогрес у практичній реалізації.

Проаналізувавши структуру додаткових (до генерації енергоблоками діючих АЕС) джерел електрогенерації, а також джерел теплогенерації централізованих систем опалення та гарячого водопостачання великих міст України (табл. 1), зроблено висновок, що обрана спільно з фахівцями чеського центру *CESTA SYNERGOATOM* (м. Прага) базова технічна концепція реакторної установки електричною потужністю 55 МВт і тепловою потужністю 180 МВт є оптимальною. Такий вибір обґрунтований такими ключовими факторами:

1 Загальні положення та призначення

1.1 Малі модульні реактори являють собою малі модульні ядерні енергетичні установки водоядерного типу під тиском (PWR/ВВЕР), призначені для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії.

Вибір технології ВВЕР зумовлений тим, що вона є добре відомою та референтною для України. В країні накопичено значний кадровий потенціал – висококваліфікованих і досвідчених фахівців у сфері проєктування, виготовлення обладнання, експлуатації, ремонту та технічного обслуговування енергоблоків ВВЕР, а також у галузі ядерної безпеки та забезпечення відповідності вимогам ядерно-регуляторної бази.

Ця обставина становить суттєву перевагу, оскільки дозволяє значно скоротити терміни проєктування, погодження проєктної документації, ліцензування, виготовлення обладнання, будівництва та введення в експлуатацію енергоблоків укра-

їнських ММР на базі водо-водяних реакторних установок під тиском типу PWR/ВВЕР.

1.2 Проєктна філософія українського ММР:

– опора на експлуатаційно перевірені рішення;

– виключення експериментальних та неперевірених технологій;

– орієнтація на спрощене ліцензування та промислово реалізованість.

1.3 Експлуатаційна філософія ММР:

– нормальний режим: 2 петлі + 2 головних циркуляційних насоса (ГЦН);

– наявність третього (резервного) насоса ГЦН, який підключається до однієї з петель у випадку виходу з ладу в ній штатного насоса ГЦН;

– ключовий принцип – проста схема в нормальній експлуатації та гнучка у перехідних режимах;

– проєкт українського ММР свідомо уникає надмірної складності та зберігає експлуатаційну спадковість із ВВЕР-типом.

1.4 Проєкт орієнтований на застосування в умовах:

– реконструкції та модернізації енергосистем;

– посткризових і постконфліктних юрисдикцій;

– децентралізованих і розподілених енергетичних мереж;

– поетапного введення потужності без порушення існуючої інфраструктури.

1.5 Параметри українського ММР:

– номінальна електрична потужність – 55 МВт;

– номінальна теплова потужність реактора – 180 МВт;

– теплоносій – легка вода;

– режим експлуатації – базове навантаження з можливістю маневровості;

– призначення теплової енергії – паротурбінний цикл промислове та комунальне теплопостачання;

– двопетлева архітектура, наявність резервного насоса ГЦН, первинний контур; компенсатор тиску;

– вторинний контур для перетворення частини теплової енергії в електричну із застосуванням конденсаційної турбіни та відбору частини теплової енергії через окремий теплообмінник відбору тепла для забезпечення теплом для опалення і гарячим водопостачанням комунальних та промислових споживачів;

– системи керування, захисту та безпеки.

2 Загальна архітектура українського ММР

2.1 В основі архітектури українського ММР лежить еволюційний розвиток експлуатаційно перевіреної технології ВВЕР із зменшенням потужності та кількості петель при збереженні традиційної для галузі конструктивної, експлуатаційної та регуляторної філософії.

Таблиця 1 – Джерела електрогенерації і теплогенерації централізованих систем опалення та гарячого водопостачання великих міст України

Місто	Генеруючий об'єкт (енергоблок)	Потужність електрична, МВт	Потужність теплова, МВт
1	2	3	4
Київ	ТЕЦ-5:	700, з них:	1 130, з них:
	Енергоблок № 1	100	185
	Енергоблок № 2	100	185
	Енергоблок № 3	250	380
	Енергоблок № 4	250	380
	ТЕЦ-6:	500, з них:	760, з них:
	Енергоблок № 1	250	380
	Енергоблок № 2	250	380
	Дарницька ТЕЦ	160	1 430
	Станція тепlopостачання СТ «Біличі»	–	580
	Станція тепlopостачання СТ «Позняки	–	465
	Станція тепlopостачання СТ-1	–	350
	Станція тепlopостачання СТ-2	–	350
	Котельня Виноградар	–	270
	Котельня Микільська Борщагівка	–	260
	Котельня Нивки	–	230
	Котельня Воскресенка	–	210
	Котельня Відрадний	–	190
	Котельня Молодь	–	175
	Котельня Осокорки	–	140
	Котельня Теремки	–	130
	Котельня Лісовий масив	–	120
	Котельня Троєщина	–	105
Котельня Велика	–	105	
Усього генерації по м. Київ:		1 360	7 000
Львів	ТЕЦ-1:	68, з них:	930, з них:
	Енергоблок № 1	15	205
	Енергоблок № 2	15	205
	Енергоблок № 3	15	205
	Енергоблок № 4	15	205
	Енергоблок № 5	8	110
	Відокремлені районні котельні систем теплозабезпечення	–	890
Усього генерації по м. Львів:		68	1 820
Дніпро	Дніпровська ТЕЦ	61,6	581,5
	Локальні котельні м. Дніпро	–	2 672,5
Усього генерації по м. Дніпро:		61,6	3 254
Запоріжжя	Запорізька ТЕЦ:	150, з них:	1 350, з них:
	Турбоагрегат № 1	50	450
	Турбоагрегат № 2	50	450
	Турбоагрегат № 3	50	450
	Запорізька ТЕС:	2 850, з них:	–
	Енергоблок № 1	300	–
	Енергоблок № 2	300	–
	Енергоблок № 3	325	–
	Енергоблок № 4	325	–
	Енергоблок № 5	800	–
	Енергоблок № 6	800	–
Локальні котельні м. Запоріжжя	–	2 530	
Усього генерації по м. Запоріжжя:		3 000	3 880

Продовження таблиці 1

Місто	Генеруючий об'єкт (енергоблок)	Потужність електрична, МВт	Потужність теплова, МВт
1	2	3	4
Кривий Ріг	Криворізька ТЕС:	1 300, з них:	140, з них:
	Турбіна № 1	125	15
	Турбіна № 2	125	15
	Турбіна № 3	125	15
	Турбіна № 4	125	15
	Турбіна № 5	200	20
	Турбіна № 6	200	20
	Турбіна № 7	200	20
	Турбіна № 8	200	20
	Локальні котельні м. Кривий Ріг	–	2 080
	Когенераційні установки	95	–
	Турбіна № 7	200	20
Усього генерації по м. Кривий Ріг:		1 395	2 220
Миколаїв	Миколаївська ТЕЦ	40	476
	Локальні котельні м. Миколаїв	–	511
Усього генерації по м. Миколаїв:		40	987
Херсон	Херсонська ТЕЦ	80	814
	Локальні котельні м. Херсон	–	523
	Біогазова електростанція	0,85	–
Усього генерації по м. Херсон:		80,85	1 337
Одеса	Одеська ТЕЦ	68	906
	Котельні комунальні	–	2 128
	Великі районні котельні	–	1 821
	Великі районні котельні	–	1 821
	Малі котельні	–	307
Усього генерації по м. Одеса:		68	5 162
Вінниця	Вінницька ТЕЦ	10	306
	Котельні комунальні	–	640
Усього генерації по м. Вінниця:		10	946
Суми	Сумська ТЕЦ	40	407
	Сумська ЕГТУ-16	16	20
	ТОВ "КППВ"	–	80
Усього генерації по м. Суми:		56	507
Житомир	Житомирська ТЕЦ	13	22
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	1 625
	Інші енергогенеруючі установки	16	–
Усього генерації по м. Житомир:		29	1 647
Івано-Франківськ	Теплові електростанції	2,4	220
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	2 743
	Теплоелектроцентралі	–	937
	Інші енергогенеруючі установки	0,5	63
Усього генерації по м. Івано-Франківськ:		2,9	3 963
Кропивницький	Теплоелектроцентралі	49,1	650
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	1 802
	Інші енергогенеруючі установки	879,9	764
Усього генерації по м. Кропивницький:		929	3 216
Луцьк	Теплогенеруючі установки, котельні	–	1 682
	Інші енергогенеруючі установки	20,9	138
Усього генерації по м. Луцьк:		20,9	1 820

Кінець таблиці 1

Місто	Генеруючий об'єкт (енергоблок)	Потужність електрична, МВт	Потужність теплова, МВт
1	2	3	4
Полтава	Теплові електростанції	10,3	–
	Теплоелектроцентралі	379,9	2 555
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	3 136
	Інші енергогенеруючі установки	101,9	235
Усього генерації по м. Полтава:		492,1	5 926
Рівне	Теплогенеруючі установки, котельні	–	2 291,3
	Інші енергогенеруючі установки	2 893,6	1 349,2
Усього генерації по м. Рівне:		2 893,6	3 640,5
Тернопіль	Теплоелектроцентралі	43,1	568,8
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	1 642
	Інші енергогенеруючі установки	71,2	–
Усього генерації по м. Тернопіль:		114,3	2 210,8
Ужгород	Теплогенеруючі установки, котельні	–	263,4
	Інші енергогенеруючі установки	281	36,9
Усього генерації по м. Ужгород:		281	300,3
Харків	Теплоелектроцентралі	815	3 465,7
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	7 326,9
	Інші енергогенеруючі установки	2 421	510,4
Усього генерації по м. Харків:		3 236	11 303
Хмельницький	Теплоелектроцентралі	49	395,4
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	2 180,6
	Інші енергогенеруючі установки	2 336	525,7
Усього генерації по м. Хмельницький:		2 385	3 101,7
Черкаси	Черкаська ТЕЦ ПРАТ «Хімволокно»	230	1 695,7
	Теплогенеруючі установки, котельні	–	711,9
	Інші енергогенеруючі установки	89,7	378
Усього генерації по м. Черкаси:		319,7	2 785,6
Чернівці	Теплогенеруючі установки, котельні	–	1 160,7
	Інші енергогенеруючі установки	1 750	147,7
Усього генерації по м. Чернівці:		1 750	1 308,4
Чернігів	Теплогенеруючі установки, котельні	–	1 573,7
	Інші енергогенеруючі установки	233,3	635,2
Усього генерації по м. Чернігів:		233,3	2 208,9

2.2 Орієнтація на постачальника – на паливні рішення компанії *Westinghouse*, сумісні з PWR/ВВЕР-типом.

2.3 Керування реактивністю:

- поглинаючі стрижні;
- борна кислота в теплоносії.

3 Підсумкова концептуальна формула українського ММР

Український ММР, що проектується – це компактна двопетлева реакторна установка PWR/ВВЕР-типу з електричною потужністю 55 МВт та тепловою потужністю 180 МВт з активною зоною на базі паливних паливних рішень компанії *Westinghouse*, орієнтована на еволюцію ВВЕР, подальшу оптимізацію параметрів та забезпечення балансу між простотою, резервуванням,

керуваністю й ліцензованістю (рис. 1).

Обговорення результатів

Обрана базова технічна концепція реакторної установки українського енергоблоку ММР з електричною потужністю 55 МВт і тепловою потужністю 180 МВт є оптимальною для забезпечення енергетичних потреб великих та індустріальних міст України, насамперед невеликих обласних центрів та інших населених пунктів. За умови встановлення одного або кількох модулів такі енергоблоки здатні частково чи повністю задовольняти потреби міст, громад і промислових підприємств у електричній та тепловій енергії.



Рис. 1 – Принципова схема енергоблоку українського ММР з когенерацією електричної та теплової енергії:

- 1 – ядерний острів; 2 – компенсатор тиску; 3 – перемикаючий клапан; 4 – корпус реактора, активна зона; 5 – петля А; 6 – петля Б; 7 – парогенератор А; 8 – парогенератор Б; 9 – ГЦН А; 10 – ГЦН Б; 11 – запірний/зворотній клапан А; 12 – запірний/зворотній клапан Б; 13 – запірний/зворотній клапан; 14 – резервний ГЦН-С; 15 – турбогенератор (55 МВт); 16 – конденсатор; 17 – конденсатний насос; 18 – деаератор/поживний бак; 19 – поживний насос; 20 – теплообмінник опалювальної мережі

Проведений аналіз підтверджує, що вибір номінальної електричної потужності 55 МВт та номінальної теплової потужності 180 МВт є цілком обґрунтованим. Такий рівень потужності забезпечує оптимальний компроміс між енергоефективністю, можливістю серійного виробництва обладнання та гнучкістю інтеграції в локальні й регіональні електричні мережі. Енергоблок ММР потужністю 55 МВт може працювати в режимі базового навантаження, ефективно поєднуватися з відновлювальними джерелами енергії, а також використовуватися для когенерації теплової енергії та забезпечення промислових потреб.

Обрані параметри потужності особливо відповідають сучасним викликам енергетичної безпеки України як у воєнний, так і в післявоєнний періоди. Децентралізоване розміщення кількох енергоблоків ММР суттєво знижує вразливість енергосистеми, підвищує її живучість і дозволяє здійснювати поетапне відновлення генеруючих потужностей, зокрема шляхом будівництва на майданчиках пошкоджених під час війни ТЕЦ і ТЕС.

Вибір саме такої потужності також зумовлений можливістю розміщення енергоблоків ММР на майданчиках існуючих міських ТЕЦ і ТЕС. Це дозволить використовувати наявну енергетичну інфраструктуру – розподільчі пристрої, системи передачі та розподілу електричної і теплової енергії – для резервного дублювання або заміни пошкоджених енергоблоків. Встановлення від 2 до 6 модулів ММР на одному майданчику дасть змогу забезпечити загальну потужність від 110 до 330 МВт, а також використовувати частину блоків у режимі гарячого резерву для маневрування потужністю та вирівнювання пікових навантажень.

Вибір перевіреної технології водо-водяного реактора під тиском типу PWR/ВВЕР для україн-

ського ММР також не є випадковим. Ця технологія є добре відомою та референтною в Україні. Наявність значної кількості висококваліфікованих фахівців у сферах проектування, виготовлення обладнання, експлуатації, ремонту та ядерної безпеки дозволяє суттєво скоротити терміни проектування, погодження документації, ліцензування, виготовлення обладнання, будівництва та введення в експлуатацію енергоблоків ММР.

Ключовими завданнями та перевагами впровадження енергоблоків ММР такої потужності для енергетичної системи України є:

- якнайшвидше відновлення генерації в посткризових і постконфліктних умовах;
- забезпечення електричною та тепловою енергією об'єктів військової та критичної інфраструктури;
- підтримка післявоєнного відновлення населених пунктів і промисловості;
- реконструкція та модернізація існуючих теплоенергетичних об'єктів, передусім ТЕЦ і ТЕС;
- децентралізоване розгортання генеруючих потужностей;
- поетапне введення потужностей в експлуатацію з максимальним використанням наявної інфраструктури без її суттєвої перебудови;
- підвищення стійкості та живучості енергосистеми країни в цілому;
- гнучке керування генерацією з можливістю;
- покриття власних і зовнішніх навантажень;
- резервування та заміщення потужностей ТЕЦ і ТЕС у разі їх пошкодження або руйнування;
- виробництва «зеленого» водню методом електролізу в періоди надлишку електроенергії;
- роботи в гібридних режимах спільно з відновлювальними джерелами енергії (сонячними та вітровими).

Висновки

1 Проведене дослідження підтвердило, що для умов України найбільш обґрунтованою є концепція малого модульного реактора на основі перевіреної водо-водяної технології PWR/ВВЕР, оскільки саме вона забезпечує найкраще поєднання технологічної зрілості, регуляторної зрозумілості, кадрової сумісності та можливості використання наявної промислової бази. Відмова від надмірно складних або експериментальних рішень істотно підвищує реалістичність подальшого проєктування, ліцензування та серійного впровадження такого енергоблоку.

2 Визначені параметри енергоблоку – 55 МВт електричної та 180 МВт теплової потужності – є не випадковим компромісом, а результатом зіставлення потенційного попиту великих і середніх міст України з можливостями когенераційної роботи, децентралізованого розміщення та модульного нарощування потужності. Така конфігурація дозволяє одночасно забезпечувати електропостачання, тепlopостачання та резервування потужності, що особливо важливо для міських агломерацій і промислових споживачів.

3 Обрана двопетлева схема з примусовою циркуляцією теплоносія і резервним ГЦН є раціональною з точки зору надійності та експлуатаційної гнучкості. Вона зберігає спадковість із традиційними рішеннями для ВВЕР, але водночас спрощує технічне обслуговування, підвищує живучість установок в перехідних і нештатних режимах та зменшує ризики, пов'язані з упровадженням принципово нових схем.

4 Результати аналізу міст України показують, що ММР такого класу може бути практичним інструментом для відновлення та модернізації пошкодженої енергетичної інфраструктури, насамперед на майданчиках ТЕЦ і ТЕС. Це дає змогу не просто замінювати втрачені потужності, а будувати більш стійку, децентралізовану та менш вразливу енергосистему, здатну працювати в умовах воєнних ризиків, аварійних відключень і сезонних піків навантаження.

5 Запропонована концепція має не лише енергетичне, а й ширше системне значення: вона створює передумови для поєднання атомної генерації з відновлюваними джерелами, для розвитку когенерації та для майбутніх виробництв, зокрема електролізу водню. Отже, український ММР у запропонованому вигляді можна розглядати як реалістичну технологічну основу для довгострокової декарбонізації, енергетичної безпеки та післявоєнного відновлення країни.

6 У підсумку, виконане дослідження доводить доцільність переходу від загальної ідеї ММР до конкретної проєктної реалізації з чітко визначеними параметрами, архітектурою та сферою за-

стосування. Це не лише концептуальна пропозиція, а технічно аргументований напрям створення українського енергоблоку нового покоління, сумісного з національними умовами експлуатації та стратегічними завданнями енергетичного розвитку.

Інформація щодо наборів даних

Нові набори даних у рамках цього дослідження не створювалися.

Заява про внесок авторів

Сотник М. І.: збір та обробка даних, формальний аналіз.
Ратушний О. В.: наукове керівництво, фінансування.
Хованський С. О.: концептуалізація, методологія, написання – початковий варіант.

Колісніченко Е. В., Свинаренко М. С.: перевірка результатів, написання – рецензування та редагування.

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.

Заява щодо фінансування та подяки

Це дослідження виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України, у межах науково-дослідної роботи «Розроблення головного циркуляційного насоса і парогенератора для малого модульного реактора (SMR)», № ДР 0126U000865, термін виконання: 2026–2028 роки.

Заява щодо конфлікту інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту

У процесі підготовки цієї роботи автори використовували ChatGPT 5.3 і Grammarly з метою мовного редагування тексту і перекладу. Весь згенерований контент було перевірено та відредаговано авторами. Автори несуть повну відповідальність за зміст публікації.

Список літератури

1. Vlasenko M. Nuclear Energy of Ukraine and possible deployment of Small Modular Reactors in the energy mix / M. Vlasenko, L. Benkovskiy // INPRO Dialogue Forum on Legal and Institutional Issues in the Global Deployment of Small Modular Reactors, 18–21 October 2016, IAEA, Vienna. – 2016. – 27 p. – URL: https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df13/Presentations/014_Ukrainian%20Nuclear%20Energy%20and%20possible%20deployment%20of%20Small%20Modular%20Reactors%20in%20the%20energy%20mix.pdf (дата звернення 12.04.2026).
2. Kim B. J. Decades of development: A bibliometric analysis of small modular reactor research / B. J. Kim, Y. Bae, P. Kim // Nuclear Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 57, Is. 12. – Paper No. 103800. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103800>.
3. Vinoya C. L. State-of-the-Art Review of Small Modular Reactors / C. L. Vinoya, A. T. Ubando, A. B. Culaba, W.-H. Chen // Energies. – 2023. – Vol. 16, Is. 7. – Paper No. 3224. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073224>.
4. Kang, J. S. Comprehensive review of small modular reactor development focusing on challenges in the backend nuclear fuel cycle / J. S. Kang, I. G. Chang, J. H. Cheong // Nuclear Engineering and Technology. – 2026. – Vol. 58, Is. 3. – Paper No. 104000. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.104000>.
5. IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS) / International Atomic Energy Agency (IAEA) // Small Modular Reactors Catalogue. – 2024. – URL:

- https://aris.iaea.org/Publications/SMR_catalogue_2024.pdf (дата звернення 12.04.2026).
- Fernández-Arias P. Bibliometric Review and Technical Summary of PWR Small Modular Reactors / P. Fernández-Arias, D. Vergara, Á. Antón-Sancho // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, Is. 13. – Paper No. 5168. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en16135168>.
 - Kakaei, P. Multi-physics core analysis and verification of NuScale reactor with coupling PARCS/RELAP / P.Kakaei, M. Zangian, M. Abbasi // *Annals of Nuclear Energy*. – 2023. – Vol. 193. – Paper No. 110021. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110021>.
 - Small Modular Reactors / World Nuclear Association. – 06 May 2026. – URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-power-reactors/small-modular-reactors/small-modular-reactors> (дата звернення 12.04.2026).
 - Liou J. What are Small Modular Reactors (SMRs)? / J. Liou // International Atomic Energy Agency (IAEA) Office of Public Information and Communication. – 13 September 2023. – URL: <http://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> (дата звернення 12.04.2026).
 - Kang H. O. Light water SMR development status in Korea / H. O. Kang, B. J. Lee, S. G. Lim // *Nuclear Engineering and Design*. – 2024. – Vol. 419(Suppl. C). – Paper No. 112966. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112966>.
 - The Future of Advanced Nuclear Energy / NuScale Power // NuScale Power Module. – Назва з екрану. – URL: <https://www.nuscalepower.com/products/nuscale-power-module> (дата звернення 12.04.2026).
 - Boado Magan H. CAREM Project Status / H. Boado Magan, D. F. Delmastro, M. Markiewicz, E. Lopasso, F. Diez, M. Giménez, A. Rauschert, S. Halpert, M. Chocrón, J. C. Dezzutti, H. Pirani, C. Balbi, A. Fittipaldi, M. Schlamp, G. M. Murmis, H. Lis // *Science and Technology of Nuclear Installations*. – 2011. – Vol. 2011, Is. 1. – Paper No. 140373. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/140373>.
- References (transliterated)**
- Vlasenko M., Benkovskiy L. (2016), “Nuclear Energy of Ukraine and possible deployment of Small Modular Reactors in the energy mix”, *INPRO Dialogue Forum on Legal and Institutional Issues in the Global Deployment of Small Modular Reactors, 18–21 October 2016, IAEA, Vienna*, 27 p., Access mode: https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df13/Presentations/014_Ukrainian%20Nuclear%20Energy%20and%20possible%20deployment%20of%20Small%20Modular%20Reactors%20in%20the%20energy%20mix.pdf (accessed 12 April 2026).
 - Kim B. J., Bae Y., Kim P. (2025), “Decades of development: A bibliometric analysis of small modular reactor research”, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 57, is. 12, paper no. 103800, <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103800>.
 - Vinoya C. L., Ubando A. T., Culaba A. B., Chen W.-H. (2023), “State-of-the-Art Review of Small Modular Reactors”, *Energies*, vol. 16, is. 7, paper no. 3224, <https://doi.org/10.3390/en16073224>.
 - Kang, J. S., Chang I. G., Cheong J. H. (2026), “Comprehensive review of small modular reactor development focusing on challenges in the backend nuclear fuel cycle”, *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 58, is. 3, paper no. 104000, <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.104000>.
 - International Atomic Energy Agency (IAEA) (2024), “IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS)”, Small Modular Reactors Catalogue, Access mode: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_catalogue_2024.pdf (accessed 12 April 2026).
 - Fernández-Arias P., Vergara D., Antón-Sancho Á. (2023), “Bibliometric Review and Technical Summary of PWR Small Modular Reactors”, *Energies*, vol. 16, is. 13, paper no. 5168, <https://doi.org/10.3390/en16135168>.
 - Kakaei, P., Zangian, M., Abbasi M. (2023), “Multi-physics core analysis and verification of NuScale reactor with coupling PARCS/RELAP”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 193, paper no. 110021, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110021>.
 - World Nuclear Association (2026), *Small Modular Reactors*, Access mode: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-power-reactors/small-modular-reactors/small-modular-reactors> (accessed 12 April 2026).
 - Liou J. (2023), “What are Small Modular Reactors (SMRs)?”, *International Atomic Energy Agency (IAEA) Office of Public Information and Communication*, Access mode: <http://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> (accessed 12 April 2026).
 - Kang H. O., Lee B. J., Lim S. G. (2024), “Light water SMR development status in Korea”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 419(Suppl. C), paper no. 112966, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112966>.
 - NuScale Power (2026), “The Future of Advanced Nuclear Energy”, *NuScale Power Module*, Access mode: <https://www.nuscalepower.com/products/nuscale-power-module> (accessed 12 April 2026).
 - Boado Magan H., Delmastro D. F., Markiewicz M., Lopasso E., Diez F., Giménez M., Rauschert A., Halpert S., Chocrón M., Dezzutti J. C., Pirani H., Balbi C., Fittipaldi A., Schlamp M., Murmis G. M., Lis H. (2011), “CAREM Project Status”, *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2011, is. 1, paper no. 140373, <https://doi.org/10.1155/2011/140373>.

Надійшла (received) 29.04.2026
 Прийнята (accepted) 16.05.2026
 Публікація (published) 29.05.2026

Відомості про авторів /About the Authors

Сотник Микола Іванович (Sotnyk Mykola) – доктор технічних наук, професор; Сумський державний університет, завідувач кафедри прикладної гідроаеромеханіки; м. Суми, Україна; e-mail: m.sotnik@pgm.sumdu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-8161>.

Ратушний Олександр Валерійович (Ratushyi Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент; Сумський державний університет, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки; м. Суми, Україна; e-mail: o.ratushnyj@pgm.sumdu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3525-0953>.

Хованський Сергій Олександрович (Khovanskyi Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки; м. Суми, Україна; e-mail: s.khovanskyi@pgm.sumdu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2435-7787>.

Колісниченко Едуард Васильович (Kolishnichenko Eduard) – кандидат технічних наук, доцент; Сумський державний університет, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки; м. Суми, Україна; e-mail: ed.kolishnichenko@pgm.sumdu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3116-7455>.

Свинаренко Максим Сергійович (Svynarenko Maksym) – кандидат технічних наук, доцент; Харківська державна академія дизайну і мистецтв, завідувач кафедри ФВП; м. Харків, Україна; e-mail: svynarenko.maksym@ksada.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9134-2759>.