

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація.** В дослідженні розглядається нова технологія ядерної енергетики - малі модульні реактори (ММР), які відрізняються від традиційних атомних електростанцій (АЕС) меншою потужністю, відповідно, своїми розмірами, маневреністю потужності, пасивною безпекою, можливістю масового виробництва. У роботі також розглядається питання про те, чи дійсно ці нові проекти можуть подолати ці виклики, з особливим акцентом на економічні питання та майбутні перспективи. Коротко розглядаються технічні проблеми, з якими стикаються поточні конструкції реакторів, і той факт, що їм можуть знадобитися десятиліття, щоб стати економічно конкурентоспроможними, якщо в такі конструкції не буде достатніх інвестицій. Проведено аналіз основних характеристик, типів, переваг та недоліків малих модульних реакторів, а також перспектив їх впровадження в Україні та світі. Особлива увага приділяється безпеці та екологічній стійкості реакторів, а також їх перевагам та потенційним викликам, пов'язаним з використанням малих модульних реакторів типів SMR-160, B&W mPower та BWRX-300.

**Ключові слова:** малі модульні реактори, атомні електростанції.

**Abstract.** The study examines a new nuclear power technology - small modular reactors (SMRs), which differ from traditional nuclear power plants (NPPs) in lower power, respectively, in their size, power maneuverability, passive safety, and the possibility of mass production. The paper also examines the question of whether these new designs can really overcome these challenges, with a special emphasis on economic issues and future prospects. The technical problems faced by current reactor designs are briefly discussed, and the fact that they may take decades to become economically competitive if there is no sufficient investment in such designs. An analysis of the main characteristics, types, advantages and disadvantages of small modular reactors, as well as the prospects for their implementation in Ukraine and the world, is conducted. Special attention is paid to the safety and environmental sustainability of reactors, as well as their advantages and potential challenges associated with the use of small modular reactors of the SMR-160, B&W mPower, and BWRX-300 types.

**Keywords:** small modular reactors, nuclear power plants.

### Вступ

Зі зростанням населення планети та швидким розвитком економіки перед сучасним світом постають виклики, пов'язані з енергетичною безпекою та стійкістю. У цьому контексті ядерна енергетика стає надзвичайно важливим елементом сучасної енергетичної системи. Атомна енергетика забезпечує надійність електропостачання, зменшує залежність від запасів вугілля і нафти і є одним з найбільш екологічно безпечних видів енергії [1]. З часів енергетичної кризи 1970-х років світова спільнота шукає альтернативні джерела енергії, які є ефективними, стійкими та екологічно чистими. Ядерна енергетика вийшла на перший план як одна з таких альтернатив. Зараз це найрозвиненіший вид невідновлюваної енергії на планеті. Переваги атомної енергетики вражають. Перш за все, вона забезпечує велику кількість енергії при мінімальній витраті палива. Навіть невеликі обсяги ядерного палива можуть забезпечити великомасштабне енергопостачання. Крім того, ядерна енергетика є досить екологічно безпечною, оскільки не супроводжується викидами парникових газів або забрудненням повітря, що сприяє боротьбі зі зміною клімату [2]. Ще однією важливою перевагою атомної енергетики є її надійність. АЕС мають високий рівень надійності та стійкості до зовнішніх впливів, таких як стихійні лиха або техногенні аварії. Стратегічно розташовані системи безпеки та управління забезпечують мінімізацію ризику виникнення небезпечних ситуацій на атомних електростанціях.

Розглядаючи всі переваги атомної енергетики, варто відзначити, що до неї необхідно ставитися з відповідальністю і увагою. Питання безпеки, поводження з ядерними відходами та поширення ядерних технологій повинні підлягати постійному контролю та регулюванню. Незважаючи на важливість ядерної енергетики, слід враховувати і її потенційні недоліки. Одним з основних аспектів є проблема поводження з радіоактивними відходами, які потребують безпечного зберігання та подальшої переробки протягом тривалого періоду. Крім того, ризик можливих ядерних аварій та можливість

зловживання ядерними технологіями також вимагають постійного контролю та впровадження високих стандартів безпеки [3].

Атомна енергетика продовжує розвиватися і вдосконалюватися, використовуючи нові технології, матеріали і конструкції. Одним із напрямків розвитку є створення малих модульних реакторів, головною перевагою яких є висока маневреність потужності, фактично час виходу на пікову потужність та мінімальний, який у середньому становить 27 та 25 хвилин відповідно, порівняно з великими АЕС цей час значно перевищує той, що дається для ММР. Таким чином, не актуальним питанням є заміна традиційних атомних електростанцій на даному етапі розвитку, а заміна маневрених теплових електростанцій (ТЕС) в енергосистемах країни на більш екологічно чисті АЕС. Особливо яскраво це видно на прикладі поточної частки виробництва електроенергії на ТЕС у світі, цей показник коливається в межах 43-56%, порівняно з АЕС – близько 10%. Час розгортання живлення на ТЕС також знаходиться в межах 20-30 хвилин, тому можна досить впевнено стверджувати, що ММР не поступаються ТЕС за цим показником на даному етапі розвитку. Більше того, у зв'язку з ситуацією в нашій країні, яка спричинена повномасштабним вторгненням російської федерації, частка ТЕС в енергобалансі України щодня знижується через масовані ракетні обстріли енергооб'єктів, які відповідають не лише за генерування, а й за підтримання балансу.

### Результати дослідження

Малі модульні реактори – це не нова, а новітня технологія. Реактори малої потужності мають свою історію, яка бере свій початок ще з 1940-х років. Основна ідея їх створення виникла в результаті досліджень і розробок, ініційованих ВПС, армією і флотом США. Найбільш схожим на ММР виявився реактор, розроблений армією США в рамках військової програми ядерної енергетики. На той момент було побудовано вісім реакторів малої потужності. Всі вони розташовувалися на ділянках з однаковими характеристиками, які на сьогоднішній день також вважаються перспективними для будівництва ММР [5]. Напрацювання минулого стали основою для створення ММР для задоволення світових енергетичних потреб та зменшення зміни клімату.

ММР мають низку переваг, а саме: мають невелику потужність та модульний характер установки. Розміщення цих реакторів буде можливим навіть у найвіддаленіших місцях, де немає доступу або доступ до мережі обмежений. ММР за своєю суттю скорочують витрати та час на будівництво, дозволяють виготовляти, ремонтувати та навіть замінювати реактори швидше та ефективніше, а також можуть бути розгорнуті поступово для задоволення зростаючого попиту на енергію.

Велика частина ММР розробляється за допомогою стандартизованих компонентів та процесів виробництва, що спрощує їх виробництво та експлуатацію. Ця стандартизація дозволяє виробникам зосередитися на покращенні технічних характеристик та зниженні витрат, використовуючи вже перевірені рішення. Крім того, стандартизація дозволяє легко адаптувати та модернізувати ММР в майбутньому, оскільки компоненти можуть бути замінені або оновлені без значного переоснащення системи в цілому. Такий підхід також сприяє швидкому впровадженню нових технологій та підвищує надійність та ефективність ММР [6].

Важливою складовою є термін будівництва, так як звичайні агрегати великої потужності, наприклад 1000 МВт, будуються протягом 10 років, вартістю близько 15 млрд доларів США (в залежності від проекту ці показники можуть змінюватися), що підвищує ризики зупинки будівництва через зміну політичного курсу в країні або деяких інших факторів. Такі, як економічний, наприклад. ММР, у свою чергу, мають менший термін будівництва, від 3 до 5 років, що дає їм перевагу в тому, що вони швидше вводяться в експлуатацію. Звичайно, враховуючи, що кількість модульних реакторів потрібна більше, ніж та, що відповідає кількості великих реакторів для виробництва однакової кількості електроенергії або для задоволення тієї ж встановленої потужності, кількість матеріалу буде відповідно більшою, тому вартість однієї і тієї ж кількості електроенергії буде дорожчою. Але, як і у випадку з сонячними електростанціями, вартість знизиться, якщо буде розроблена технологія виробництва, а це означає, що більші обсяги виробництва забезпечать економію на масштабі.

ММР можуть стати гарною альтернативою для заміни застарілих реакторів, оскільки мають довший термін служби. Крім того, ММР можуть бути інтегровані в існуючі енергетичні мережі України, забезпечуючи стабільність та гнучкість енергопостачання. Все залежить від проекту, але можна домогтися тривалого терміну служби - 40-80 років [7-11].

Залежно від типу реактора можливе навіть використання ядерних відходів великих атомних електростанцій на ММР, наприклад, реакторів на швидких нейтронах. У цих реакторах

використовується особлива конструкція, що дозволяє використовувати паливо, яке містить плутоній та інші важкі елементи, які утворюються в процесі експлуатації звичайних атомних електростанцій, а також паливо, що використовується на великих атомних електростанціях [12].

Важливо, що, хоча ММР та АЕС працюють на радіоактивному паливі, радіаційний фон біля ТЕС вищий, ніж на АЕС, тому впровадження ММР замість вже існуючих ТЕС також позитивно вплине на довкілля та здоров'я персоналу станції. Ще одним позитивним фактором для будівництва ММР на заміну ТЕС або приєднання до АЕС можна відзначити меншу площу території, необхідну для будівництва всіх необхідних приміщень та установок. Якщо традиційний реактор займає площу близько 400 000 м<sup>2</sup>, то ММР - 40 000 м<sup>2</sup> [13].

### Економічний аналіз будівництва та експлуатації реакторів в порівнянні з сучасним реактором АЕС потужністю 1260 МВт

Будівництво та експлуатація атомних реакторів потребують значних інвестицій, але ці витрати виправдовуються стабільністю та довговічністю таких проєктів. Сучасні реактори, наприклад потужністю близько 1260 МВт, мають відносно високі початкові витрати на будівництво, але вони компенсуються низькими витратами на паливо та обслуговування протягом десятиліть роботи.

Технології будівництва АЕС, мають перевагу в стандартизації: багато реакторів будуються за однаковими проєктами, що знижує ризики та прискорює їх реалізацію. Модульні реактори можуть бути дешевшими у будівництві, адже їхні компоненти виготовляються на заводах і швидко монтується на місці.

В таблицях 1-3, наведені економічні дані про доцільність будівництва та експлуатації різних типів ММР. Наведені дані показують, як можуть впливати на питому та загальну вартість ММР побудованих на одиничний блок, об'єднані два блоки, розташування блоків на одній території, модульний конструктивний фактор та інші економічні та технічні фактори.

Таблиця 1 - Оцінка конкурентноспроможності SMR-160

Параметр	Кількість на станції			
	1	2	4	8
Номінальна електрична потужність SMR (МВт)	160,00			
Модульний конструктивний фактор	0,75			
Фактор співрозташування	0,70			
Номінальна потужність LR (МВт)	1260,00			
Загальна вартість LR (мільярд доларів)	4,75			
Питома капітальна вартість LR овернайт (\$/кВт)	3769,84			
Коефіцієнт масштабування n (0,45-0,7)	0,51			
Масштабована капітальна вартість (млрд доларів)	1,66			
Масштабований питоми капітал (\$/кВт)	10363,01			
Спільне використання систем підготовки однієї пари близнюків* (74-85%)	-	0,80	0,80	
Спільне використання систем підготовки двом парам близнюків* (82-95%)	-	-	0,89	
Коефіцієнт собівартості за одиницю окремо розташованого реактора	1,55	-	-	-
Коефіцієнт потужності	0,90			
Коефіцієнт вартості одиниці об'єднаних реакторів	-	0,90	-	-
Коефіцієнт вартості одиниці двох об'єднаних реакторів	-	-	0,87	-
Коефіцієнт вартості одиниць багатомодульної конструкції	-	-	-	0,71
Збільшення витрат на непередбачені обставини, %	1,05			
Питома капітальна вартість ММР (\$/кВт)	8452,16	6085,56	5882,71	4272,74
Капітальна вартість SMR (млрд доларів)	1352,35	973,69	941,23	683,64
Загальний приріст питомої вартості у порівнянні з LR	2,24	1,61	1,56	1,13
Витрати на непередбачувані обставини	422,61	304,28	294,14	213,64
Витрати на проєктування та ліцензування (\$/кВт)	6,25	6,25	6,25	6,25

Відсоткова ставка виплати кредиту (\$/кВт)	657,68	473,53	457,75	332,47
Загальна капітальна вартість MMP на одиницю (\$/кВт)	9538,71	6869,62	6640,84	4825,10
Загальна капітальна вартість заводу SMR на одиницю (млрд доларів)	1,53	1,10	1,06	0,77
Вартість станції з MMP (млрд доларів)	-	-	-	6,08
Відсоток збільшення вартості MMP порівняно з LR до врахування додаткових умов, %	-	-	-	179,26
Відсоток збільшення вартості MMP порівняно з LR після врахування додаткових умов, %	-	-	-	27,99

Таблиця 2 - Оцінка конкурентноспроможності B&W mPower

Параметр	Кількість на станції			
	1	2	4	7
Номінальна електрична потужність SMR (МВт)	180,00			
Модульний конструктивний фактор	0,77			
Фактор співрозташування	0,71			
Номінальна потужність LR (МВт)	1260,00			
Загальна вартість LR (мільярд доларів)	4,75			
Питома капітальна вартість LR овернайт (\$/кВт)	3769,84			
Коефіцієнт масштабування n (0,45-0,7)	0,51			
Масштабована капітальна вартість (млрд доларів)	1,76			
Масштабований питоми капітал (\$/кВт)	9781,85			
Спільне використання систем підготовки однієї пари близнюків* (74-85%)	-	0,80	0,80	
Спільне використання систем підготовки двом парам близнюків* (82-95%)	-	-	0,89	
Коефіцієнт собівартості за одиницю окремо розташованого реактора	1,55	-	-	-
Коефіцієнт потужності	0,90			
Коефіцієнт вартості одиниці об'єднаних реакторів	-	0,90	-	-
Коефіцієнт вартості одиниці двох об'єднаних реакторів	-	-	0,87	-
Коефіцієнт вартості одиниць багатомодульної конструкції	-	-	-	0,71
Збільшення витрат на непередбачені обставини, %	1,05			
Питома капітальна вартість MMP (\$/кВт)	8239,37	5932,34	5734,60	4165,16
Капітальна вартість SMR (млрд доларів)	1483,09	1067,82	1032,23	749,73
Загальний приріст питомої вартості у порівнянні з LR	2,19	1,57	1,52	1,10
Витрати на непередбачувані обставини	411,97	296,62	286,73	208,26
Витрати на проектування та ліцензування (\$/кВт)	5,56	5,56	5,56	5,56
Відсоткова ставка виплати кредиту (\$/кВт)	641,13	461,61	446,22	324,10
Загальна капітальна вартість MMP на одиницю (\$/кВт)	9298,01	6696,13	6473,11	4703,08
Загальна капітальна вартість заводу SMR (млрд доларів)	1,67	1,21	1,17	0,85
Вартість станції з MMP (млрд доларів)	-	-	-	5,93
Відсоток збільшення вартості MMP порівняно з LR до врахування додаткових умов, %	-	-	-	159,48
Відсоток збільшення вартості MMP порівняно з LR після врахування додаткових умов, %	-	-	-	24,76

Таблиця 3 - Оцінка конкурентноспроможності BWRX-300 [15]

Параметр	Кількість на станції			
	1	2	4	5
Номінальна електрична потужність SMR (МВт)	280,00			
Модульний конструктивний фактор	0,85			
Фактор співрозташування	0,73			
Номінальна потужність LR (МВт)	1260,00			
Загальна вартість LR (мільярд доларів)	4,75			

Питома капітальна вартість LR овернайт (\$/кВт)	3769,84			
Коефіцієнт масштабування n (0,45-0,7)	0,51			
Масштабована капітальна вартість (млрд доларів)	2,21			
Масштабований питоми капітал (\$/кВт)	7877,66			
Спільне використання систем підготовки однієї пари близнюків* (74-85%)	-	0,80	0,80	
Спільне використання систем підготовки двом парам близнюків* (82-95%)	-	-	0,89	
Коефіцієнт собівартості за одиницю окремо розташованого реактора	1,55	-	-	-
Коефіцієнт потужності	0,90			
Коефіцієнт вартості одиниці об'єднаних реакторів	-	0,90	-	-
Коефіцієнт вартості одиниці двох об'єднаних реакторів	-	-	0,87	-
Коефіцієнт вартості одиниць багатомодульної конструкції	-	-	-	0,71
Збільшення витрат на непередбачені обставини, %	1,05			
Питома капітальна вартість MMP (\$/кВт)	7532,50	5423,40	5242,62	3807,83
Капітальна вартість SMR (млрд доларів)	2109,10	1518,55	1467,93	1066,19
Загальний приріст питомої вартості у порівнянні з LR	2,00	1,44	1,39	1,01
Витрати на непередбачувані обставини	376,62	271,17	262,13	190,39
Витрати на проектування та ліцензування (\$/кВт)	3,57	3,57	3,57	3,57
Відсоткова ставка виплати кредиту (\$/кВт)	586,12	422,01	407,94	296,30
Загальна капітальна вартість MMP на одиницю (\$/кВт)	8498,81	6120,15	5916,26	4298,09
Загальна капітальна вартість заводу SMR (млрд доларів)	2,38	1,71	1,66	1,20
Вартість станції з MMP (млрд доларів)	-	-	-	5,42
Відсоток збільшення вартості MMP порівняно з LR до врахування додаткових умов, %	-	-	-	132,18
Відсоток збільшення вартості MMP порівняно з LR після врахування додаткових умов, %	-	-	-	14,01

### Порівняння вартості будівництва MMP з існуючими АЕС

Очікується, що малі модульні реактори будуть дорожчими за одиницю продукції через те, що економісти знали протягом десятиліть і називають економією на масштабі. Більші реактори (або інші електростанції) дешевші за мегават, оскільки їхні капітальні та експлуатаційні витрати, які представляють потреби в матеріалах та робочій силі, не є лінійно пропорційними потужності.

Рівняння 1 та 2 показують, як розрахувати питому SMR і загальну вартість капіталу відповідно, використовуючи криву економії від масштабу з рисунка 1.

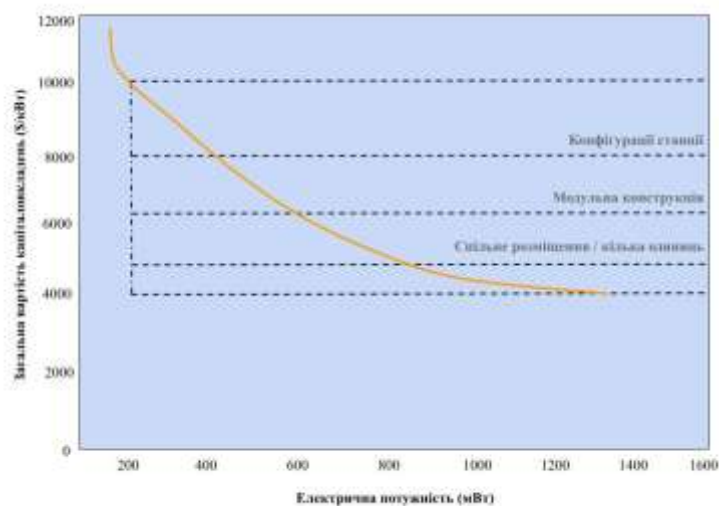


Рисунок 1 - Приклад економії від масштабу та коефіцієнтів зниження [14]

Це, по суті, масштабує капітальні витрати як функцію номінальної потужності. У цих рівняннях і є великими номінальна потужність реактора та SMR у МВт відповідно. являє собою коефіцієнт масштабування, який, як повідомляється, коливається від 0,4 до 0,7 залежно від конкретного проекту SMR. Агентство з ядерної енергії визначило середній коефіцієнт масштабування 0,51, який використовується в розрахунках. Слід зазначити, що ці рівняння зазвичай застосовуються в діапазоні енергій від 300 МВт до 1300 МВт. Багато SMR мають потужність, яка нижче цього діапазону, що збільшує невизначеність у цьому розрахунку.

$$\frac{\text{Expenses}(P_1)}{P_1} = \frac{\text{Expenses}(P_0)}{P_0} \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{n-1}; \quad (1)$$

$$\text{Expenses}(P_1) = \text{Expenses}(P_0) \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^n. \quad (2)$$

Витрати, отримані з рівнянь 1 і 2, потім коригуються на основі факторів розвитку, використання маданчика та будівництва конкретного проекту SMR.

### **Розрахунок загальної вартості капітальних інвестицій**

Загальна вартість капітальних інвестицій (TCIC) - це всеохоплююча капітальна вартість станції (або одноразова початкова вартість), розроблена з метою розрахунку станції. Ця вартість є базовою вартістю будівництва плюс непередбачені витрати, витрати на подорожчання вартості будівництва через інфляцію, IDC (відсотки під час будівництва), витрати замовника (включно з пусковими витратами комунальних підприємств), витрати на введення в експлуатацію (некомунальні пускові витрати) і початкові витрати на паливну активну зону (для реактора). TCIC включає витрати OCC (вартість будівництва об'єкту без нарахування відсотків) та IDC (відсотки під час будівництва).

Для цього економічного дослідження TCIC можна наближено визначити з рівняння 3:

$$TCIC = DD \& E + OCC(1 + CC) + IDC, \quad (3)$$

де DD&E – це витрати на детальне проектування та інжиніринг, CC – це непередбачені витрати, а IDC - це відсотки під час будівництва.

Конкретні витрати на дослідно-конструкторські роботи для проектів ММР відсутні, оскільки компанії бажають зберігати їх у таємниці на ранніх стадіях розробки.

Однак, за оцінками Роснера і Голдберга, 0,8-1 млрд. дол. США - це консервативна оцінка витрат на розробку нового проекту ММР, який відповідатиме вимогам Комісії ядерного регулювання, передбачатиме кошторис витрат на будівництво першого заводу ММР, а також проектно-кошторисну документацію, необхідну для будівництва заводу-виробника, що спеціалізується на ММР.

Вартість будівництва визначає питому вартість електроенергії в короткостроковій і середньостроковій перспективі, але вартість палива впливає на питому вартість у довгостроковій перспективі [15].

Непередбачені витрати виникають через зміни в політичних, регуляторних, фінансових і т.д. умовах під час будівництва. Агентство з ядерної енергії заявляє, що це може збільшити капітальні витрати на великі ядерні реактори на 5-10% у світі і приблизно на 5% у США.

Припускається, що цей же відсоток може бути застосований і до ММР. З іншого боку, передбачається, що ММР матимуть непередбачені витрати на рівні 15-55% під час будівництва першого модуля, але в подальшому дані значення будуть коригуватись і з високою ймовірністю будуть значно менші, а можливо будуть взагалі відсутні. Фактично зі збільшенням потужності блоку ММР збільшується відповідно вартість, що тягне за собою збільшення непередбачуваних витрат.

Питомі капітальні витрати на будівництво окремого великого блоку реактора варіюються в залежності від окремого проекту, але знаходяться в межах 3500-4800 дол.США/кВт на одиницю потужності.

Більшу питому вартість варто застосовувати по відношенню до менш потужних реакторів, як у випадку з ММР, що видно з отриманих розрахунків.

## Висновки

Впровадження нових технологій є великим викликом не лише для України, а й для світу. У цій ситуації російської агресії для України важливо бути енергонезалежною та забезпечувати стабільну роботу енергосистеми у будь-який час. Будівництво та введення в експлуатацію нової технології ММР потребує великих інвестицій в економіку нашої країни, оскільки під час війни знайти такі кошти з власних доходів буде складно, якщо не неможливо. Також необхідно забезпечити необхідну законодавчу базу для функціонування таких об'єктів та врегулювати питання інвестицій у цей сектор енергетики, адже ядерна безпека є ключовою вимогою для створення таких амбітних проєктів. Також необхідно налагодити виробництво деталей для ММР саме в Україні, що підвищить інтерес інших країн до інвестицій та знизить вартість будівництва для нашої країни. Збільшивши встановлену потужність виробництва електроенергії, ми матимемо можливість експортувати її за кордон у періоди її профіциту, що також збільшить термін служби ММР та тривалість одного циклу завантаженого палива, адже кількість змін потужності зменшуватиметься в широких межах.

Чинний тариф для теплових електростанцій у 3 рази вищий за тариф на електроенергію з АЕС. Однак реконструкція, яку зараз проводять власники ТЕС, спрямована, судячи з усього, на те, щоб вичавити з обладнання «пенсійного» віку навіть те, що з нього вже не вийде. Кількість реконструйованих блоків збільшується і витрати палива на виробництво електроенергії зростають.

Хоча вартість ММР атомного енергоблоку значно вища, ніж вартості ТЕС, ми стикаємося з тією ж перевагою, що й у випадку з традиційним енергоблоком АЕС: тривалість роботи буде довшою, безпека – вищою. Також у перспективі можлива повна перебудова виробництва електроенергії на АЕС, замінивши ці потужності на ММР, з метою запобігання або зниження ризиків виникнення енергетичної та екологічної небезпеки.

Оскільки технології ММР є інноваційними, вони не повною мірою відповідають нормам та правилам, що діють в Україні. Законодавча та нормативна база України розроблена таким чином, що на території країни можна побудувати лише ядерну установку типу ВВЕР. Всі інші сучасні (зокрема, енергоблоки великої потужності) матимуть відхилення від національних вимог, але при цьому матимуть значно вищі показники безпеки.

Завдяки своїй модульній конструкції реактор BWRX-300 є більш економічно вигідним у порівнянні з іншими наведеними прикладами реакторів. Вартість будівництва та експлуатації таких модульних реакторів значно нижча, що робить їх привабливими з економічної точки зору для країн з обмеженими ресурсами та фінансовими можливостями. Даний тип ММР виграє серед інших саме більшою номінальною потужністю одиниці блоку. Тому лише опираючись на ефект масштабування було зрозуміло, що даний тип реактора є економічно вигідніший за інший, особливо, якщо будувати кількість реакторів на станції, яка б задовільнила умову близького значення сумарної потужності блоків, як і великого. Хоча варто зазначити, що ефект масштабування може мати менший вплив на питому вартість ММР. Однак, як і будь-яка інша форма ядерної енергетики, реактор BWRX-300 також стикається з проблемами, які вимагають ретельного моніторингу та безпеки.

Реактор BWRX-300 є важливим кроком у розвитку ядерних технологій, спрямованих на забезпечення сталого, безпечного та ефективного енергопостачання. Модульна конструкція, економічність і гнучкість у використанні роблять його привабливим варіантом для нашої країни і світу.

За наявності неминучих змін в атомній енергетиці нашої країни, потрібно вже починати заміну та загальне збільшення наявних потужностей. Використання нових технологій, а саме ММР у сфері атомної енергетики в Україні сприятиме подальшому розвитку сучасних енергетичних систем країни. Розглянуті ММР є мізерною частиною тих, що розробляються в світі, які можливо буде впровадити і в Україні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копишинська К. О. (2019). Сучасний стан та перспективи інноваційного розвитку атомної енергетики України / К. О. Копишинська, І. С. Широкова // Економічний вісник НТУУ «КПІ», с. 350-359.
2. Ю.В. Малогулко Дослідження використання малих модульних реакторів в Україні / Малогулко Ю. В., Бандура І. В., Сліденко М. // "Вісник Хмельницького національного університету". Технічні науки. – 2023. (329) No 6. - з. 394-399. ISSN 2307-5732. DOI 10.31891/2307-5732-2023-329-6-394-399.
3. Досягнення в розробці технології малих модульних реакторів: додаток до: Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 edition, Int. At. Енергетичне агентство, Відень, Австрія, 2020.
4. Редакція сайту Uatom.org. (2020, 24 липня) «Нові реакторні технології: реалії та перспективи» (2020, 24 липня). <https://www.uatom.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>.

5. Тетяна Вербицька. (2023, 13 березня). Що таке малі модульні реактори, будівництво яких розглядає Україна. [https://biz.censor.net/resonance/3403084/scho\\_take\\_mali\\_modulni\\_reaktory\\_budivnytstvo\\_yakyh\\_rozglydaye\\_ukrayina](https://biz.censor.net/resonance/3403084/scho_take_mali_modulni_reaktory_budivnytstvo_yakyh_rozglydaye_ukrayina).
6. Malogulko Yu., Slidenko M. (2024). SMALL MODULAR REACTORS. Norwegian Journal of Development of the International Science, 134, 88–102. <https://zenodo.org/records/11640424>
7. Тетяна Вербицька. (2023, 6 січня). Малі модульні реактори як альтернатива ТЕС: чисті, маневрені, ефективні. <https://infoatom.news/2023/01/06/060120231211>.
8. Микола Топалов. (2022 р., 18 листопада). Міні-атомні електростанції для України: чи врятують країну малі модульні реактори, про які говорив Зеленський. <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/11/18/693990/>.
9. Малогулко Ю. В., Сліденко М. О. (2024, 17-18 травня) ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ТИПУ NUWARD <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/468/12567/26285-1>.
10. Ю.В. Малогулко, М.О. Сліденко (2023, 18 грудня), ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/19751>.
11. Сліденко М. О. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ТИПІВ SC-HTGR ТА IMSR/ Сліденко М. О., Малогулко Ю.В.// Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 9-10 травня 2024. Рівне: НУВГП, 2024, ст. 130-133.
12. Ольга Чайка. (2023 р., 24 березня). У Міненерго хочуть побудувати 20 малих ядерних реакторів. Цю технологію ще ніхто в світі не впроваджував. Скільки це може коштувати. <https://forbes.ua/company/minenergo-khoche-pobuduvati-20-malikh-yadernikh-reaktoriv-tsyu-tehnologiyu-shche-ne-realizuvav-nikhto-v-sviti-skilki-vona-mozhe-koshtuvati-24032023-12541>
13. Український ядерний форум. (2020 р., 6 листопада). Малий модульний реактор Holtec SMR-160 після 10 років розробки вступає в процес ліцензування USNRC. [http://www.atomforum.org.ua/news/2020/malij\\_modulnij\\_reaktor\\_holtec\\_smr\\_160\\_pislya\\_10\\_rokiv\\_rozrobki\\_vstupaye\\_v\\_proces\\_li\\_cenzuvannya\\_usnrc](http://www.atomforum.org.ua/news/2020/malij_modulnij_reaktor_holtec_smr_160_pislya_10_rokiv_rozrobki_vstupaye_v_proces_li_cenzuvannya_usnrc)
14. J. Halfinger and M. Haggerty (May 2012) “The B&W mPower™ Scalable, Practical Nuclear Reactor Design,” Nuclear Technology, Vol. 178, No. 2, pp. 164-169.
15. Малогулко Ю.В. Аналіз вартості палива та конкурентоспроможності малих модульних реакторів у порівнянні з сучасними великими реакторами / Малогулко Ю.В., М.О. Сліденко // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції, (м. Тернопіль, Україна, м. Ополь, Польща, 10-11 вересня 2024 р.). С. 127-131. – ISSN 2522-932X.

**Юлія Володимирівна Малогулко** — к.т.н., доцент кафедри електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [Juliya\\_Malogulko@ukr.net](mailto:Juliya_Malogulko@ukr.net).

**Сліденко Микола Олегович** – студент групи ЕС-21б, Факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [slidenkonick@gmail.com](mailto:slidenkonick@gmail.com).

**Juliya V. Malogulko** — Ph.D., Assistant Professor of electrical stations and systems department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [Juliya\\_Malogulko@ukr.net](mailto:Juliya_Malogulko@ukr.net).

**Mykola O. Slidenko** - student of group ES-21b, Faculty of Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [slidenkonick@gmail.com](mailto:slidenkonick@gmail.com).