

УДК 621.31; 621.039.5

Тетяна Нечаєва*, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0001-9154-4545>
Ірина Лещенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0003-3382-4762>
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150,
Україна
*Автор-кореспондент: nechaieva.tan@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ УКРАЇНИ

Анотація. *Задекларовані Україною цілі сталого екологічно прийнятнього розвитку енергетики, скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької угоди вимагають переважного розвитку атомної та відновлюваної енергетики. Водночас в умовах поточного дефіциту маневрених потужностей збільшення в енергосистемі обсягів стохастичної генерації відновлюваних джерел енергії та виведення з експлуатації маневрених вугільних енергоблоків відповідно до міжнародних екологічних зобов'язань обумовлює необхідність вивчення можливостей запровадження в ОЕС України нових технологій АЕС, які зможуть брати участь у добовому маневруванні. У статті наведено огляд стану розроблення та реалізації перших проєктів АЕС з малими модульними реакторами американських компаній NuScale Power та Holtec International. Показано, що вітчизняне ядерне законодавство не виділяє ММР як окрему групу ядерних установок і не враховує їх особливості, що обумовлює необхідність проведення ґрунтовного фахового порівняльного аналізу поточної нормативної бази України та інших країн з цього питання, за результатами якого має прийматись рішення щодо необхідності розроблення спеціальних регулюючих вимог для ММР та визначення області застосування існуючих нормативних документів. Наведено результати розрахунків прогнозу структури генеруючих потужностей ОЕС України на період до 2040 р., які показали, що будівництво в Україні 3 потужних удосконалених енергоблоків АЕС та впровадження енергоблоків з ММР загальною потужністю 1,5 ГВт, які можуть використовуватися у добових режимах зміни потужності, зі збереженням 13 ГВт базової потужності існуючих атомних енергоблоків та скороченні потужності існуючих вугільних енергоблоків до 5 ГВт з їх реконструкцією для виконання вимог Національного плану скорочення викидів при зростаючому обсязі відновлюваної генерації здатні забезпечити баланс навантаження енергосистеми та зменшити викиди забруднюючих речовин щонайменше на 50% та парникових газів – до 30%.*

Ключові слова: малий модульний реактор, технічні характеристики, законодавча та нормативна база, енергосистема, режим роботи.

1. Вступ

Ключовим викликом для розвитку енергетики України є необхідність її повоєнного відновлення за умови виконання міжнародних зобов'язань країни щодо сталого низьковуглецевого розвитку її економіки. Затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 № 179 Національна економічна стратегія України на період до 2030 року визначає одним з ключових орієнтирів в економічній політиці України декарбонізацію економіки з досягненням кліматичної нейтральності до 2060 р. Енергетична стратегія України до 2050 року, схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р, передбачає досягнення Україною вуглецевої нейтральності енергетичного сектору до 2050 р. з максимальним скороченням використання вугілля в енергетичному секторі [1]. Тому при визначенні перспектив розвитку національної енергосистеми необхідно враховувати заплановані цільові показники та відповідні заходи для декарбонізації

вітчизняної електроенергетики.

Задекларовані Україною цілі сталого екологічно прийнятного функціонування і розвитку енергетики, відмова від споживання викопного палива задля скорочення викидів парникових газів відповідно до зобов'язань Паризької угоди, стратегічних документів країни щодо низьковуглецевого розвитку обумовлює надання переваги у використанні атомної та відновлюваної енергетики. Для енергосистеми України такий напрям можливо забезпечити за рахунок збереження значної частки атомної генерації. Водночас більшість вітчизняних енергоблоків АЕС вже перетнули 30-річний проєктний термін експлуатації і отримали дозвіл на продовження роботи на 10–20 років з можливістю подальшої пролонгації. За умови 30-річного продовження термінів експлуатації атомних енергоблоків до 2040 р. буде виведено з експлуатації 2 енергоблоки ВВЕР-440, до 2050 р. – 10 блоків ВВЕР-1000. Крім того, впровадження значних обсягів генерації на відновлюваних джерелах (ВДЕ) з негарантованою потужністю – сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій – збільшує потребу у гнучкості енергосистеми з кардинальною зміною структури генеруючих потужностей та умов їх функціонування.

На заміщення тих атомних енергоблоків, що поступово будуть виводитися з експлуатації, НАЕК «Енергоатом» розглядає як будівництво нових потужних сучасних енергоблоків, так і впровадження у наступному десятиріччі електростанцій з малими модульними реакторами (ММР) [2]–[3]. Крім того, ММР можуть заміщувати вугільні енергоблоки, які будуть виводитися з експлуатації відповідно до міжнародних екологічних зобов'язань України, і брати участь у добовому маневруванні.

Отже, метою даної статті є представлення результатів дослідження техніко-економічних особливостей та перспектив функціонування ММР у складі енергосистеми України, огляду законодавчої бази їх запровадження в нашій країні.

2. Методи та матеріали

Враховуючи значний дефіцит маневрених потужностей в Україні, рішення щодо впровадження нових технологій АЕС як гнучких практично безвуглецевих потужностей необхідно приймати з урахуванням їх можливості добового маневрування. У світі наразі розробляються та впроваджуються удосконалені та новітні реактори з більш високою експлуатаційною гнучкістю та підвищеною безпекою, що забезпечить їх використання як надійного та маневреного джерела енергії. НАЕК «Енергоатом» вивчає різні технології ММР, аналізуючи їхню можливість впровадження в Україні, в тому числі ММР NuScale від NuScale Power і SMR-160 від Holtec International [3].

Стандартну конструкцію енергоблока АЕС NuScale, що складається з 12 ММР з водою під тиском одиничною потужністю 50 МВт, було схвалено Комісією з ядерного регулювання США (U.S. Nuclear Regulatory Commission – NRC) у вересні 2020 р. [4]. Це перший ліцензований NRC проєкт АЕС з ММР. З початку 2023 р. на технічній перевірці Комісії з ядерного регулювання США знаходиться заявка NuScale Power на затвердження оновленого стандартного дизайну конфігурації електростанції АЕС VOYGR™-6 з 6 модулями NuScale одиничною потужністю 77 МВт [5]. Наразі NuScale Power має 19 підписаних чинних внутрішніх й міжнародних угод щодо розгортання АЕС з ММР у 12 країнах, у тому числі в Польщі, Румунії, Чехії, Болгарії [6].

Електростанція VOYGR™ від NuScale Power може вміщувати 4, 6 або 12 окремих модулів NuScale Power Module™ [7]. Стандартна електростанція складатиметься з 12 модулів загальною потужністю 924 МВт. Таку електростанцію можна розмістити в межах існуючої вугільної електростанції, оскільки вона потребує близько 1,3 квадратних миль (близько 3,37 кв. км) на 1000 МВт встановленої потужності. При цьому передбачається перепрофілювання та використання частини виробничої інфраструктури вугільної електростанції, наприклад, системи подачі охолоджуючої води, демінералізації води, протипожежного захисту і розподільчої станції, а також адміністративних, складських будівель тощо.

Проєкт АЕС NuScale характеризується значною експлуатаційною гнучкістю: кожен модуль NuScale може пропускати 100% виходу пари в конденсатор або у виробничий процес, тобто

виробляти водень або промислову теплову енергію. Енергетичний модуль NuScale здатний змінювати потужність реактора зі швидкістю 40% за годину. Також проєктом передбачено швидку зміну потужності в широкому діапазоні – від 20% до 100%. Для ще швидшого реагування на попит на електроенергію MMP NuScale може швидко знизити вихідну потужність до 10% за хвилину і повернутись до повної потужності з тією ж швидкістю, використовуючи байпас турбіни [8].

Оцінка базової капітальної вартості, проведена Департаментом енергетики США у 2020 р. [9] для АЕС NuScale з модулями одиночної потужності 50 МВт, становила 6191 \$/кВт. Проведена оцінка як прямих, так і непрямих капітальних витрат на впровадження 12-модульної АЕС NuScale одиничної потужності 60 МВт [10], що базувалася на системі обліку витрат відповідно до кодів рахункової системи департаменту енергетики США, показала питомі базові капітальні витрати на рівні 3465,7 \$/кВт. Для 12-модульної установки потужністю 924 МВт компанія наприкінці 2020 р. визначила капітальну вартість 2850 доларів США/кВт [11].

Проведене у 2021 р. детальне дослідження [12] капітальних, експлуатаційних витрат та витрат на виведення з експлуатації 12-модульної електростанції потужністю 924 МВт компанії NuScale показало, що середньозважена собівартість електроенергії (LCOE) електростанції NuScale складатиме 64 дол. США/МВт·год, що забезпечує її конкурентоспроможність порівняно з вугільною електростанцією, LCOE якої оцінено у 73 дол. США/МВт·год, при зниженій волатильності виробничих витрат та майже повній відсутності викидів забруднюючих речовин та парникових газів.

Початок роботи першої електростанції NuScale з шістьма модулями одиночною потужністю 77 МВт очікується до кінця цього десятиліття в Національній лабораторії Айдахо Міністерства енергетики США. Очікується, що перший NuScale Power Module™ почне виробляти електроенергію у 2029 р., а решта модулів підключиться до повної роботи станції до 2030 р. Будівництво цієї електростанції забезпечується в рамках реалізації Проєкту безвуглецевої електроенергетики (the Carbon Free Power Project – CFPP) [13], ініціативи, яку очолює державний енергетичний консорціум Utah Associated Municipal Power Systems.

Компанія Holtec International (США) разом з дочірньою компанією SMR, LLC розробляють енергетичний MMP заводського виготовлення потужністю 160 МВт під назвою SMR-160 [14]. Для кожного блока вартістю \$600 млн (3750 \$/кВт) передбачено 24-місячний період будівництва, а термін експлуатації – не менше 80 років [11]. Проєктом АЕС SMR-160 передбачено швидку зміну вихідної потужності відповідно до зміни потреби в електроенергії. SMR-160 призначений для роботи в якості розподіленого джерела енергії.

У серпні 2020 р. проєкт SMR-160 пройшов першу фазу трифазної перевірки дизайну постачальника Канадською комісією з ядерної безпеки (Canadian Nuclear Safety Commission – CNSC) перед ліцензуванням [15]. Також триває передліцензійна взаємодія SMR, LLC компанії Holtec з Комісією з ядерного регулювання США, пов'язана з майбутньою заявкою на дозвіл на будівництво [16]. У листопаді 2021 р. компанія Holtec заявила, що прагне отримати ліцензію на будівництво SMR-160 в США у 2025 р.

У жовтні 2022 р. компанія Holtec уклала Меморандум про угоду з компаніями Škoda Praha та Hyundai Engineering and Construction для просування планів будівництва SMR-160 у Чехії. Компанія Holtec Britain подала заявку на приєднання до урядового процесу Великої Британії щодо загальної оцінки конструкції реактора SMR-160 у Сполученому Королівстві на початку 2023 р., що дозволить розпочати будівництво першого британського блока вже у 2028 р. Holtec має намір розгорнути до 2050 р. серійне виробництво 32 SMR-160 (5,1 ГВт) для Великої Британії [17].

Що стосується України, то MMP є новими технологіями, впровадженню яких має передувати вдосконалення національної законодавчої бази щодо їх спорудження, експлуатації та поводження з відпрацьованим ядерним паливом. На сьогодні діяльність у сфері використання ядерної енергії в Україні регулюють:

- Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 12, ст. 81);
- Закон України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії» (Відомості

Верховної Ради України (ВВР), 2000, № 9, ст. 68);

– Закон України «Про порядок прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, які мають загальнодержавне значення» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2005, № 51, ст. 555);

– Закон України «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2012, № 40, ст. 476), який встановлює правові засади поводження з відпрацьованим ядерним паливом, зберігання відпрацьованого ядерного палива лише реакторів типу ВВЕР;

– Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001, № 1, ст. 1);

– Закон України «Про впорядкування питань, пов'язаних із забезпеченням ядерної безпеки» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2004, № 46, ст. 511), основними завданнями якого є правове регулювання фінансово-економічних відносин, що виникають у зв'язку з припиненням експлуатації та зняттям з експлуатації ядерних установок.

Згідно із Законом України «Про ринок електричної енергії»:

– будівництво атомних електростанцій здійснюється з урахуванням особливостей, встановлених законами України «Про порядок прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, які мають загальнодержавне значення» та «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» (ст. 28, п. 5);

– атомні електростанції охороняються відповідно до законів України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» та «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» (ст. 27, п. 7).

Відповідно до Указу Президента України від 04.04.2019 № 104/2019 «Про заходи з підтримки розвитку ядерної енергетики та підвищення рівня безпеки у сфері використання ядерної енергії», Кабінету Міністрів України було постановлено сприяти впровадженню на атомних електростанціях сучасних технологій з високим ступенем надійності і безпеки (малих модульних реакторів) та забезпечити виробництво на вітчизняних підприємствах обладнання, необхідного для застосування таких технологій.

Відповідно до зазначеної нормативної бази впровадження ММР в Україні, як і реакторів великої генеруючої потужності, є видом діяльності, на яку поширюється дія державного регулювання у сфері використання ядерної енергії і яка провадиться на підставі ліцензій, окремих дозволів та сертифікатів відповідно до Закону України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії» та інших нормативних актів. Дозволи на такі види діяльності надаються за наявності умов, що відповідають встановленим нормам та правилам з ядерної та радіаційної безпеки.

Відповідно до Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» державне регулювання ядерної та радіаційної безпеки здійснює Державна інспекція ядерного регулювання України (Держатомрегулювання), діяльність якої спрямовується і координується Кабінетом Міністрів України. Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ), який виконує функції наукового, аналітичного, технічного, інформаційного, методичного, інженерного, консультативного й експертного супроводу діяльності Держатомрегулювання, на сьогодні має меморандуми про співробітництво в частині ліцензування ММР в Україні з компаніями Holtec Int. та NuScale Power [18]. У рамках цих меморандумів виконуються проєкти з визначення розбіжностей між американським та українським законодавством в частині забезпечення ядерної та радіаційної безпеки та оцінки впливу можливих розбіжностей на можливість впровадження SMR-160 (Holtec Int.) та технології NuScale для будівництва АЕС з ММР в Україні. Також у 2019 р. НАЕК «Енергоатом», ДНТЦ ЯРБ та Holtec International підписали Угоду про партнерство, що передбачала створення міжнародного консорціуму, метою якого було сприяння

діяльності щодо впровадження в Україні технології американських малих модульних реакторів SMR-160.

3. Результати

Аналіз українського законодавства щодо діяльності у сфері використання ядерної енергії показав, що наша законодавча та нормативно-правова база орієнтована на будівництво ядерних блоків великої потужності, а технології MMP не повною мірою відповідають чинним в країні нормам і правилам. Фахівці галузі відзначають, що поширеною світовою практикою є проведення порівняльного аналізу вимог з ядерної та радіаційної безпеки, реалізованих у проєктах MMP іноземних компаній, розміщення та експлуатація яких планується на території певної країни, з її національними вимогами з ядерної та радіаційної безпеки, що дозволяє запобігти створенню перешкод при ліцензуванні цих проєктів [19]. Для поточного стану ліцензування MMP у Канаді, США та Великій Британії характерні такі особливості, як передліцензійний процес, метою якого є визначення потенційної можливості подальшого ліцензування проєкту MMP і таким чином зниження регуляторного ризику; оцінка проєкту MMP без прив'язки до майданчика АЕС; відсутність специфічних регуляторних вимог для MMP, тобто використання чинної нормативної бази з ядерної та радіаційної безпеки із застосуванням «диференційованого підходу» [20]. Однак на сьогодні в Україні подібні нормативні вимоги відсутні.

Для визначення напрямів розвитку національної ядерної енергетики було проведено удосконалення математичної моделі визначення середньозважених собівартостей нових та перспективних атомних енергоблоків [21], в якій при обчисленні обсягів відпущеної ними електроенергії враховано змінні режими використання їх потужності при покритті добових графіків електричного навантаження енергосистеми. Це забезпечило коректніше врахування техніко-економічних параметрів новітніх атомних енергоблоків, що можуть використовуватися у гнучких режимах зміни потужності. Результати розрахунків середньозваженої собівартості виробництва електроенергії енергоблоками з MMP SMR-160 та NuScale відповідно до сформованих добових режимів їх погодинного навантаження зі зниженням потужності до 75%–50% від номінальної під час денного піку сонячної генерації та розвантаженням у вихідні дні наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Середньозважена собівартість електроенергії для добових режимів роботи АЕС з MMP

Режим роботи	Середньозважена собівартість електроенергії, дол. США/МВт год	
	MMP NuScale	MMP SMR-160
Робота на номінальній потужності протягом робочої доби та вихідних днів	82.8	87.5
Робота на номінальній потужності протягом робочої доби, розвантаження на вихідні до 75% від номінальної потужності	88.4	93.4
Робота на номінальній потужності протягом робочої доби, розвантаження на вихідні до 50% від номінальної потужності	94.4	99.8
Розвантаження кожної робочої доби з 10 до 15 години до 75%, на вихідні до 75% від номінальної потужності	91.8	97.1
Розвантаження кожної робочої доби з 10 до 15 години до 50%, на вихідні до 50% від номінальної потужності	104.8	111.1

Отримані розрахункові значення середньозваженої собівартості виробництва електроенергії для енергоблоків з MMP компаній SMR-160 та NuScale для умов України близькі до LCOE існуючих вугільних електростанцій з урахуванням витрат на їх реконструкцію з підвищенням паливної ефективності, збільшенням маневреного діапазону та відповідності сучасним екологічним вимогам, які, за нашими розрахунками, становлять близько 77–87 дол. США/МВт год.

Визначення перспективної структури ОЕС України до 2040 р. було проведено з використанням математичної моделі диспетчеризації генеруючих потужностей ОЕС України [21]–[24] для сформованих умов використання атомної та теплової генерації.

Наразі НАЕК «Енергоатом» при оцінюванні перспективи розвитку електроенергетичного сектору країни розглядає продовження строків експлуатації усіх існуючих енергоблоків на 30 років та

планує будівництво нових блоків, які замінять існуючі вже після 2040 р., а також добудову двох нових атомних блоків на Хмельницькій АЕС до 2030 р. з подальшим нарощуванням потужності при реалізації програми «Український модуль» [2]. Тому на рівні 2040 р. була розглянута експлуатація 13 існуючих енергоблоків одиначною потужністю 1000 МВт з використанням при покритті добових графіків електричного навантаження ОЕС у базовому режимі від 3 до 9 атомних енергоблоків з максимальною одиначною потужністю 980 МВт. Також при покритті добових графіків навантаження розглядалась участь до 3 нових потужних енергоблоків з реакторами AP1000, які працюють у змінних режимах з двома циклами навантаження / розвантаження від 100% до 70% від номінальної, та до 10 установок з ММР одиначною потужністю 150 МВт, які використовуються у змінних режимах з двома циклами навантаження / розвантаження в діапазоні від 60% до 100% від номінальної потужності. Приклади добових режимів зміни потужності енергоблоків з ММР, які використано при проведенні розрахунків, наведено на рис. 1.

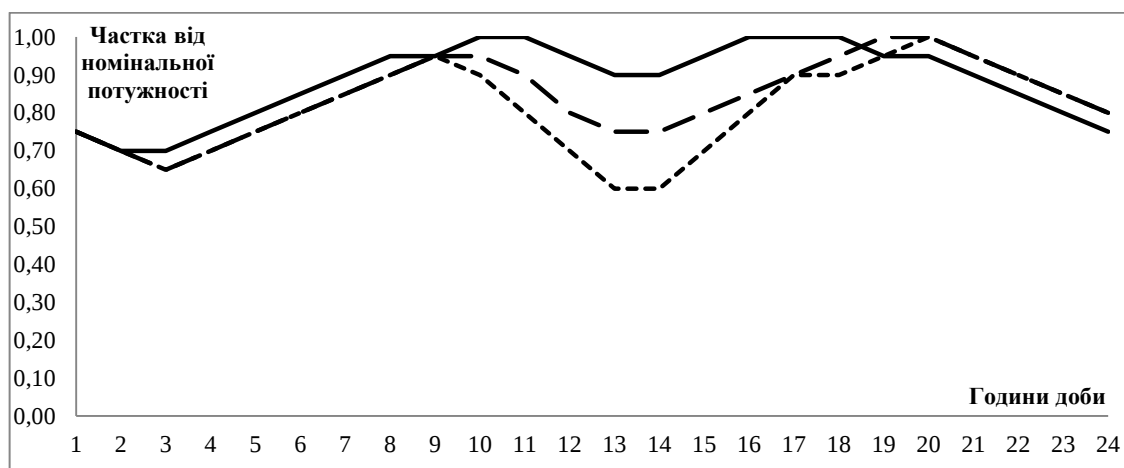


Рис. 1. Приклади заданих добових режимів використання потужності енергоблоків з ММР

Встановлені потужності ВЕС та СЕС, які працюватимуть у складі енергосистеми до 2040 р., було задано з урахуванням офіційних прогнозів щодо їх розвитку. Так, згідно з оприлюдненим на початку 2022 р. Проектом Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 р. [25], в якому індикативною ціллю є досягнення споживання електричної енергії з ВДЕ у 2030 р. на рівні 25%, встановлена потужність промислових СЕС має становити 7 ГВт, а наземних ВЕС – 4,7 ГВт. За матеріалами робочої групи «Енергетична безпека» Проекту Плану відновлення України [26], за песимістичним сценарієм потужності СЕС на рівні 2040 р. становитимуть 9,2 ГВт, а ВЕС – 4,4 ГВт. У розрахунках для 2040 року були прийняті значення встановлених потужностей СЕС – 9,5 ГВт і ВЕС – 4,5 ГВт. Графіки потужностей ВЕС та СЕС, працюючих в енергосистемі, було сформовано відповідно до фактичних даних їх потужностей в ОЕС України за 2018 рік, приведених до встановлених потужностей на 2040 рік.

Екологічні вимоги при моделюванні було враховано варіюванням стану потужностей існуючих пилувугільних енергоблоків ТЕС відповідно до очікуваного виконання умов Національного плану скорочення викидів (НПСВ). Впроваджувані заходи з відповідності екологічним вимогам НПСВ обумовлюють технічний та технологічний стан цих блоків, що, у свою чергу, впливає на рівень їх викидів парникових газів та забруднюючих речовин у прогностичному періоді.

Для першого варіанта розглянуто участь у покритті добових ГЕН 12 пилувугільних енергоблоків ТЕС одиначною потужністю 200 МВт та 12 пилувугільних енергоблоків ТЕС одиначною потужністю 300 МВт, на яких проведено маловитратну реконструкцію з подовженням терміну експлуатації без впровадження необхідного для виконання НПСВ газоочисного обладнання.

Другим варіантом відповідності екологічним вимогам передбачено скорочення встановленої потужності існуючих вугільних енергоблоків ТЕС до 5 ГВт з проведенням їх реконструкції підвищенням паливної ефективності та впровадженням необхідного для виконання умов НПСВ

газоочисного обладнання. Для можливості покриття добових ГЕН при дефіциті існуючих потужностей також розглядалася експлуатація 5 парогазових установок одиничною потужністю 150 МВт.

При моделюванні враховано використання енергоблоків нових АЕС за заданими графіками добової зміни їх потужності, сформованих відповідно до профілей добових ГЕН зі зниженням потужності під час нічного провалу споживання та денного піку потужності СЕС.

Отримані результати розрахунків наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Показники функціонування структури генеруючих потужностей ОЕС України у 2040 році відповідно до розроблених варіантів збереження потужності існуючих пилувугільних блоків ТЕС

Показник	Варіант збереження потужності існуючих ТЕС		Варіант скорочення потужності існуючих ТЕС	
	Встановлена потужність, ГВт	Виробництво електроенергії, ТВт·г	Встановлена потужність, ГВт	Виробництво електроенергії, ТВт·г
ТЕС вугільні	9.5	35.3	5.0	22.7
ТЕС газові	0.0	0.0	1.5	6.6
АЕС	17.8	78.0	17.5	83.7
ТЕЦ	6.0	10.3	6.0	10.3
ГЕС	5.0	6.0	5.0	6.0
ГАЕС	1.8	1.8	1.8	1.8
ВЕС	4.5	9.7	4.5	9.8
СЕС	9.5	10.6	9.5	10.5
АБ	2.0	0.7	2	0.7
Всього	56.8	152.3	52.8	152.0
Споживання вугілля, млн т	19.5		11.8	
Споживання природного газу, млн м ³	3.6		5.2	
Викиди CO ₂ , млн т	47.5		34.4	
Викиди сірки, тис. т	715.6		79.4	
Викиди азоту, тис. т	67.1		21.6	
Викиди пилу, тис. т	6.8		2.1	

Аналіз результатів розрахунків показав, що будівництво до 2040 р. в Україні 3 потужних енергоблоків AP1000 та впровадження проєктів енергоблоків з малими модульними реакторами загальною потужністю 1,5 ГВт при реконструкції існуючих вугільних енергоблоків загальною потужністю 5 ГВт дозволить скоротити викиди парникових газів на 27%, сірки – на 89%, азоту – на 68%, пилу – на 69%. При цьому змінні режими експлуатації нових енергоблоків АЕС дозволять забезпечити зниження їх потужності як у нічні години падіння попиту на електроенергію, так і у денні години його зниження при одночасному піку сонячної генерації. Це підвищить стійкість, надійність та ефективність функціонування Об'єднаної енергосистеми України в умовах зростання екологічних вимог та ролі відновлюваних джерел енергії.

4. Висновки

Досягнення цілей сталого низьковуглецевого розвитку обумовлює перехід до переважного використання атомної і відновлюваної генерації з поступовою відмовою від традиційної генерації на викопному паливі, що підвищує вимоги до гнучкості енергосистеми та вимагає кардинальної зміни структури генеруючих потужностей і умов їх функціонування. Збільшення гнучкості енергосистеми та її екологічності можливо забезпечити за рахунок впровадження новітніх енергоблоків АЕС, у тому числі з малими модульними реакторами, здатних працювати у режимах добової зміни потужності відповідно до змін чистого навантаження енергосистеми.

НАЕК «Енергоатом» вивчає різні технології малих модульних реакторів та можливість їх

впровадження в Україні, в тому числі в рамках підписаних меморандумів з американськими компаніями NuScale Power, проєкт першої електростанції якої з MMP NuScale вже отримав ліцензію Комісії з ядерного регулювання США, та Holtec International, яка розробляє проєкт MMP SMR-160, дизайн якого проходить передліцензійний розгляд Комісії з ядерного регулювання США та Канадської комісії з ядерної безпеки. Ці технології можуть впроваджуватися на заміщення вугільних ТЕС як екологічно чисте маневрене джерело виробництва електроенергії. Тому у перспективі доцільно розглядати впровадження цих технологій в енергосистему України, виходячи з очікуваного часу їх промислового впровадження та ліцензування.

На сьогодні вітчизняне ядерне законодавство не виділяє MMP як окрему групу ядерних установок і не враховує їх особливості. Необхідне проведення ґрунтовного фахового порівняльного аналізу поточної нормативної бази України та інших країн з цього питання, за результатами якого має прийматись рішення стосовно необхідності розроблення спеціальних регулюючих вимог для MMP та визначення області застосування існуючих національних нормативних документів.

Проведені розрахунки показали, що будівництво в Україні 3 потужних удосконалених енергоблоків АЕС та впровадження енергоблоків з MMP загальною потужністю 1,5 ГВт, які можуть використовуватися у добових режимах зміни потужності, при скороченні до 2040 р. потужності існуючих вугільних енергоблоків до 5 ГВт з проведенням їх реконструкції для виконання вимог Національного плану скорочення викидів при зростаючому обсязі відновлюваної генерації здатні забезпечити баланс навантаження енергосистеми і зменшити викиди забруднюючих речовин майже на 70% та парникових газів – до 30%.

Посилання

1. Україна – енергетичний хаб Європи. Уряд схвалив Енергетичну стратегію до 2050 року. *Сайт Міністерства енергетики України*. 1 травня 2023. URL: <https://www.mev.gov.ua/novyna/ukrayina-enerhetychnyy-khab-yevropy-uryad-skhvalyv-enerhetychnu-stratehiyu-do-2050-roku> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Годун О. Вибір типу реакторної установки для будівництва нових потужностей АЕС в Україні. *III Міжнародний круглий стіл «Перспективи впровадження інновацій в атомну енергетику»*. 24 вересня 2021. Українське ядерне товариство. URL: https://ukrns.org/images/activity/2021/2021_09_25/Godun.pdf (дата звернення: 10.04.2023).
3. Малі модульні реактори та/чи AP1000 – одна з дискусійних тем Конференції про інновації в атомній галузі. *ІнфоАтом*. 04.10.2022. URL: <https://infoatom.news/2022/10/04/041020220901> (дата звернення: 28.05.2023).
4. Design Certification – NuScale US600. *U.S.NRC*. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/nuscale.html> (дата звернення: 29.05.2023).
5. NuScale US460 Standard Design Approval Application Review. *U.S.NRC*. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/current-licensing-reviews/nuscale-us460.html> (дата звернення: 16.05.2023).
6. Projects. *NuScale Power, LLC*. URL: <https://www.nuscalepower.com/en/projects> (дата звернення: 28.05.2023).
7. VOYGR Plant Models. *NuScale Power, LLC*. URL: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants> (дата звернення: 28.05.2023).
8. Ingersoll D. T., Colbert C., Houghton Z., Snuggerud R., Gaston J. W., Empey M. Can Nuclear Energy and Renewables be Friends? *Proceedings of the 2015 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2015)*. Nice, France. May 2–6. 2015. URL: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/publications/can-nuclear-energy-and-renewables-be-friends.pdf> (дата звернення: 28.05.2023).
9. Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies. *U.S. Energy Information Administration*. February 2020. URL: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2020.pdf (дата звернення: 16.05.2023).
10. Black G. A., Aydogan F., Koerner C. L. Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 103. P. 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.041>
11. Small Nuclear Power Reactors (Updated March 2023). *World Nuclear Association*. URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (дата звернення: 16.05.2023).
12. NuScale SMR Technology: An Ideal Solution for Repurposing U.S. Coal Plant Infrastructure and Revitalizing Communities. *NuScale Power, LLC*. 2021. URL: <https://www.nuscalepower.com/->

- /media/nuscale/pdf/publications/nuscale-smr-technology-an-ideal-solution-for-coal-plant-replacement.pdf (дата звернення: 28.05.2023).
13. The Carbon Free Power Project. URL: <https://www.cfppllc.com> (дата звернення: 16.05.2023).
 14. SMR. *Holtec International*. URL: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/> (дата звернення: 16.05.2023).
 15. Phase 1 Pre-Licensing Vendor Design Review Executive Summary: SMR, LLC. *Canadian Nuclear Safety Commission*. URL: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/holtec-international-executive-summary.cfm> (дата звернення: 16.05.2023).
 16. SMR-160. *U.S.NRC*. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/pre-application-activities/holtec.html> (дата звернення: 16.05.2023).
 17. News & Videos. *Holtec International*. URL: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/news-videos/> (дата звернення: 16.05.2023).
 18. Вивчення можливості ліцензування ММР в Україні – один із пріоритетних напрямів роботи ДНТЦ ЯРБ. *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки*. URL: <https://sstc.ua/news/vivchennya-mozhливosti-licenzuvannya-mmr-v-ukrayini-odin-iz-prioritetnih-napryamiv-roboti-dntc-yarb> (дата звернення: 16.05.2023).
 19. Жабін О.І., Печериця О.В., Тараканов С.О., Шевченко І.А. Підхід до регуляторної передліцензійної оцінки проєкту ММР іноземного постачальника. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 4(88). С. 4—13. [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4\(88\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4(88).01)
 20. Дибач О.М., Плачков Г.І. Про ліцензування технології малих модульних реакторів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 1(81). С. 3—9. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).01)
 21. Нечаєва Т.П. Моделювання гнучких режимів експлуатації атомних енергоблоків у математичній моделі диспетчеризації добового графіка електричного навантаження енергосистеми України. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. Вип. 1(64). С. 29—37. <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.029>
 22. Шульженко С.В., Тюрютіков О.І., Іваненко Н.П. Модель математичного програмування з цілочисельними змінними визначення оптимального складу та завантаження енергоблоків теплових електростанцій та гідроагрегатів гідроакумуючих електростанцій при покритті добового графіка електричних навантажень енергосистеми України. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 1(60). С. 14—23. <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.014>
 23. Shulzhenko S., Turutikov O., Bilenko M. Mixed integer linear programming dispatch model for power system of Ukraine with large share of baseload nuclear and variable renewables. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine. P. 363—368. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160222>
 24. Шульженко С.В. Оптимізація диспетчеризації генеруючих потужностей енергосистеми за умови обмеження генерації вітрових та сонячних електростанцій. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 4(63). С. 14—32. <https://doi.org/10.15407/pge2020.04.014>
 25. Про Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року: Проєкт розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.01.2022. Держенергоефективності України. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii> (дата звернення: 16.05.2023).
 26. Проєкт Плану відновлення України. *Матеріали робочої групи «Енергетична безпека»*. Національна рада з відновлення України від наслідків війни. Липень 2022. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/625d81ec8313622a52e2f031/62dea1bbe535b76819acb6bf_Енергетична%20безпека.pdf (дата звернення: 16.05.2023).

PROSPECTS OF IMPLEMENTATION OF SMALL MODULAR REACTORS IN THE POWER SYSTEM OF UKRAINE

Tetiana Nechaieva*, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9154-4545>
Iryna Leshchenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0003-3382-4762>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: nechaieva.tan@gmail.com

Abstract. *Ukraine's declared goals of sustainable, environmentally acceptable energy development, and reduction of greenhouse gas emissions in accordance with the Paris Agreement require the preferential development of nuclear and renewable energy. At the same time, in the conditions of the current shortage of maneuverable capacities, the increase of stochastic generation volumes from renewable energy sources in the power system and the decommissioning of maneuverable coal-fired power units in accordance with international environmental obligations determines the need to study the possibilities of implementing new nuclear power plant technologies in the IPS of Ukraine, which will be able to*

participate in daily maneuvering. The article provides an overview of the state of development and implementation of the first NPP projects with small modular reactors of the American companies NuScale Power and Holtec International. It is shown that the national nuclear legislation does not single out MMR as a separate group of nuclear installations and does not take into account their features, which makes it necessary to carry out a thorough professional comparative analysis of the current regulatory framework of Ukraine and other countries on this issue, based on the results of which a decision should be made regarding the need to develop special regulatory requirements for MMR and determine the scope of application of existing regulatory documents. The results of the calculations of the forecast structure of generating capacities of IPS of Ukraine for the period up to 2040 are given, which showed that the construction in Ukraine of 3 powerful advanced NPP power units and the introduction of 1.5 GW of the power units with MMR, which can be used in daily power change modes, with the using of 13 GW of the baseload existing nuclear power units while reducing the capacity of existing coal-fired power units to 5 GW with their reconstruction to meet the requirements of the National Emission Reduction Plan and the growing volume of renewable generation are able to ensure the power balance system and reduce pollutant emissions by at least 50% and greenhouse gases by up to 30%.

Keywords: small modular reactor, technical standards, legal and regulatory framework, power system, operating mode.

References

1. Ukraine is the energy hub of Europe. The government approved the Energy Strategy until 2050. (2023, May 1). *Website of the Ministry of Energy of Ukraine*. URL: <https://www.mev.gov.ua/novyna/ukrayina-enerhetychnyy-khab-yevropy-uryad-skhvalyv-enerhetychnu-stratehiyu-do-2050-roku> (Last accessed: 15.05.2023) [in Ukrainian].
2. Godun, O. (2021, September 24). Selection of the type of reactor installation for the construction of new NPP capacities in Ukraine. *III International Round Table "Prospects for the Implementation of Innovations in Atomic Energy"*, Ukrainian Nuclear Society. URL: https://ukrns.org/images/activity/2021/2021_09_25/Godun.pdf (Last accessed: 10.04.2023) [in Ukrainian].
3. Small modular reactors and/or AR1000 are one of the discussion topics of the Conference on Innovations in the Atomic Industry. (2023, November 4). *InfoAtom*. URL: <https://infoatom.news/2022/10/04/041020220901> (Last accessed: 28.05.2023) [in Ukrainian].
4. Design Certification – NuScale US600. *U.S.NRC*. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/nuscale.html> (Last accessed: 29.05.2023).
5. NuScale US460 Standard Design Approval Application Review. *U.S.NRC*. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/current-licensing-reviews/nuscale-us460.html> (Last accessed: 16.05.2023).
6. Projects. *NuScale Power, LLC*. URL: <https://www.nuscalepower.com/en/projects> (Last accessed: 28.05.2023).
7. VOYGR Plant Models. *NuScale Power, LLC*. URL: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voynr-smr-plants> (Last accessed: 28.05.2023).
8. Ingersoll, D. T., Colbert, C., Houghton, Z., Snuggerud, R., Gaston, J. W., & Empey, M. (2015, May 2–6). Can Nuclear Energy and Renewables be Friends? *Proceedings of the 2015 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2015)*, Nice, France. URL: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/publications/can-nuclear-energy-and-renewables-be-friends.pdf> (Last accessed: 28.05.2023).
9. Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies. (2020, February). *U.S. Energy Information Administration*. URL: https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2020.pdf (Last accessed: 16.05.2023).
10. Black, G. A., Aydogan, F., & Koerner, C. L. (2019). Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.041>
11. Small Nuclear Power Reactors (Updated March 2023). *World Nuclear Association*. URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (Last accessed: 16.05.2023).
12. NuScale SMR Technology: An Ideal Solution for Repurposing U.S. Coal Plant Infrastructure and Revitalizing Communities. (2021). *NuScale Power, LLC*. URL: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/publications/nuscale-smr-technology-an-ideal-solution-for-coal-plant-replacement.pdf> (Last accessed: 28.05.2023).
13. The Carbon Free Power Project. URL: <https://www.cfppllc.com> (Last accessed: 16.05.2023).
14. SMR. *Holtec International*. URL: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/> (Last accessed: 16.05.2023).
15. Phase 1 Pre-Licensing Vendor Design Review Executive Summary: SMR, LLC. *Canadian Nuclear Safety Commission*. URL: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/holtec-international-executive-summary.cfm> (Last accessed: 16.05.2023).
16. SMR-160. *U.S.NRC*. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/pre-application-activities/holtec.html> (Last accessed: 16.05.2023).

17. News & Videos. *Holtec International*. URL: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/news-videos/> (Last accessed: 16.05.2023).
18. Studying SMR Licensing in Ukraine among SSTC NRS Priority Areas. *State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety*. URL: <https://sstc.ua/news/vivchennya-mozhlivosti-licenzuvannya-mmr-v-ukrayini-odin-iz-prioritetnih-napryamiv-roboti-dntc-yarb> (Last accessed: 16.05.2023).
19. Zhabin, O., Pecherytsia, O., Tarakanov, S., & Shevchenko, I. (2020). Approach to Regulatory Pre-Licensing SMR Vendor Design Review. *Nuclear and Radiation Safety*, 4(88), 4–13 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4\(88\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4(88).01)
20. Dybach, O., & Plachkov, H. (2019). On Licensing the Technology of Small Modular Reactors. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(81), 3–9 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).01)
21. Nechaieva, T.P. (2021). Modeling of flexible nuclear power unit operational modes in the mathematical model of the Ukraine's power system daily electric load profile dispatching. *The Problems of General Energy*, 1(64), 29–37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.029>
22. Shulzhenko, S.V., Turutikov, O.I., & Ivanenko, N.P. (2020). Mixed-integer linear programming mathematical model for founding the optimal dispatch plan of Ukrainian thermal power plants' units and hydro pumping storages stations' units for balancing daily load profile of power system of Ukraine. *The Problems of General Energy*, 1(60), 14–23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.014>
23. Shulzhenko, S., Turutikov, O., & Bilenko, M. (2020). Mixed integer linear programming dispatch model for power system of Ukraine with large share of baseload nuclear and variable renewables. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 363–368. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160222>
24. Shulzhenko, S.V. (2020). Optimal generation dispatch with wind and solar curtailment. *The Problems of General Energy*, 4(63), 14–32. <https://doi.org/10.15407/pge2020.04.014>
25. Pro Natsionalnyi plan dii z rozvytku vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku: Proekt rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 20.01.2022. The State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii> (Last accessed: 16.05.2023) [in Ukrainian].
26. Project of the Recovery Plan of Ukraine. (2022, July). *Materials of the "Energy Security" working group*. The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/625d81ec8313622a52e2f031/62dea1bbe535b76819acb6bf_Енергетична%20безпека.pdf (Last accessed: 16.05.2023) [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії: 20.07.2023