

## АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ТИПУ CAREM

Вінницький національний технічний університет

**Анотація.** В роботі проаналізовано функціонування малих модульних реакторів типу CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares); особливості та технічні характеристики реактора CAREM. Розглядаються його модульна конструкція, використання охолодження на основі важкої води та паливо на основі збагаченого урану. Особлива увага приділяється безпеці та екологічній стійкості реактора, а також його перевагам та потенційним викликам, пов'язаним з використанням малих модульних реакторів типу CAREM.

**Ключові слова:** *мали модульні реактори, атомна енергетика, електрична енергія.*

**Abstract.** *The work analyzes the functioning of small modular reactors of the CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) type; features and technical characteristics of the CAREM reactor. Its modular design, use of heavy water cooling, and enriched uranium fuel are discussed. Particular attention is paid to the safety and environmental sustainability of the reactor, as well as its advantages and potential challenges associated with the use of small modular reactors of the CAREM type.*

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

### Вступ

З ростом світової населеності та швидким розвитком економіки, сучасний світ стикається з викликами, пов'язаними з енергетичною безпекою та сталістю. У цьому контексті атомна енергетика стає надзвичайно важливим елементом сучасної енергетичної системи. Атомна енергетика забезпечує надійність постачання електроенергії, зменшує залежність від вугільних та нафтових резервів і є однією з найбільш екологічно безпечних форм енергії [1].

Починаючи з енергетичної кризи 1970-х років, світова спільнота шукала альтернативні джерела енергії, які були би ефективними, стійкими та екологічно чистими. Атомна енергетика вийшла на перший план як одна з таких альтернатив. Зараз вона є найбільш розвинутою формою невідновлюваної енергії на планеті. Переваги атомної енергетики вражають. Перш за все, вона забезпечує велику кількість енергії при мінімальних витратах на паливо. Навіть невеликі кількості ядерного палива здатні забезпечити великі масштаби електропостачання. Крім того, атомна енергія 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. Атомні електростанції (АЕС) мають високий рівень надійності та стійкості до зовнішніх впливів, таких як природні катаклізми або техногенні аварії. Стратегічно розташовані системи безпеки та контролю забезпечують, що ризик виникнення небезпечних ситуацій на атомних електростанціях зведений до мінімуму.

Крім того, атомна енергетика має великий потенціал у забезпеченні сталого енергетичного розвитку. Вона може допомогти зменшити залежність від вугільних палив, що сприяє зменшенню викидів шкідливих газів та забруднення повітря. Використання атомної енергії також сприяє диверсифікації енергетичного міксу країн, забезпечуючи стабільне постачання електроенергії у разі коливань цін та постачання інших джерел енергії.

Зважаючи на всі переваги атомної енергетики, варто зазначити, що необхідно ставитись до неї з відповідальністю та уважністю. Питання безпеки, управління ядерними відходами та поширення ядерної технології мають бути об'єктом постійного контролю та регулювання. Незважаючи на важливість атомної енергетики, слід брати до уваги й її потенційні недоліки. Одним із головних аспектів є проблема поводження з радіоактивними відходами, яка вимагає безпечного зберігання та подальшої обробки на тривалий період. Додатково, ризик можливих ядерних аварій та можливість зловживання ядерною технологією також вимагають постійного контролю та виконання високих стандартів безпеки [3].

## Результати дослідження

Генератором енергії на АЕС є атомний (ядерний) реактор. Для реактора з водяним охолодженням тепло, що виділяється в активній зоні в результаті ланцюгової реакції розщеплення ядер деяких важких елементів, відбирає вода (теплоносіє) першого контуру, яку пропompовують через реактор циркуляційною помпою. Нагріта вода надходить у теплообмінник (парогенератор), де передає тепло, отримане в реакторі, воді другого контуру. Вода другого контуру випаровується в парогенераторі, після чого пара, що утворюється, приводить в обертальний рух турбіну турбогенератора. У такий спосіб тепло перетворюється в електроенергію.

Вибір типу реактора, який використовують на АЕС залежить від багатьох факторів, таких як: енергетичні потреби, ефективність, безпечність, наявність ресурсів, як економічних так і паливних. У країнах колишнього СРСР найбільш поширеним типом реакторів є водо-водяний та графіт-водяні, фактично, саме вони і дісталися Україні після розпаду СРСР та зараз використовуються. У США, Великій Британії, Канаді перевага надається саме водо-гідралічному, графіто-газовому, важководному, відповідно.

На даному етапі розвитку атомної енергетики в Україні, всі наявні реактори відносяться до другого покоління, таких реакторів зараз 15. Як відомо, останніми введеними в експлуатацію були два реактори: один на Хмельницькій та ще один Рівненській АЕС у 2004 році. Будівництво 4 реакторів було повністю закрито. Створення ще 2 на даному етапі призупинено. Термін експлуатації кожного з них знаходиться в межах 30-40 років, з можливістю продовження ще на 20-40 років, але для здійснення пролонгації повинні виконуватись ряд вимог, що ускладнює розширення терміну використання. Термін експлуатації більшості реакторів спливає вже в кінці 2030 – початку 2040 роках і лише одного, на Хмельницькій АЕС, у 2050 році. Саме це і було основною проблемою атомної енергетики України до початку повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 року. Потрібно було вже починати будівництво нових блоків. Тепер, після обстрілів енергетичних об'єктів, особливо теплових електростанцій, що відіграють роль регулювальних в теперішній структурі виробництва електроенергії, захоплення найбільшої АЕС в Європі (Запорізька АЕС), що фактично має близько 50% від встановленої потужності всіх АЕС України, постали ще одні проблеми: енергетична та екологічна безпеки [4].

Вище зазначені проблеми можливо вирішити, побудувавши малі модульні реактори. Малі модульні реактори (ММР) — це сучасні ядерні реактори, які мають потужність до 300 МВт на одиницю, що становить приблизно одну третину генеруючої потужності традиційних ядерних енергетичних реакторів, які можуть виробляти велику кількість низьковуглецевої електроенергії.

ММР мають ряд переваг, а саме: вони мають малі потужності та модульний характер установлення. Розміщення даних реакторів буде можливим навіть у найвіддаленіших місцях, де немає доступу або доступ до мережі обмежений. ММР властиве зменшення витрати коштів та часу на будівництво, дозволяє швидше та ефективніше виготовляти, ремонтувати та навіть замінювати реактори, і можуть бути розгорнуті поступово, щоб задовольнити зростаючий попит на енергію. Важливою складовою є термін будівництва, так як звичайні блоки великої потужності, наприклад 1000 МВт будуються протягом 10 років, вартістю близько 15 мільярдів доларів США (в залежності від конструкції, ці показники можуть змінюватись), що збільшує ризики зупинки будівництва через зміну політичного курсу в країні чи якихось інших чинників, таких як економічний, наприклад. ММР в свою чергу мають менший термін будівництва, від 3 до 5 років, що надає їм перевагу в швидшому введенні в експлуатацію. Звісно, враховуючи те, що кількість модульних реакторів необхідна більша, ніж та, що відповідає кількості великих реакторів, щоб виготовити ту ж кількість електроенергії або відповідати тій же встановленій потужності, кількість матеріалу відповідно буде також більшою, тому вартість тієї ж кількості електроенергії буде дорожчою. Але як і в ситуації з сонячними електростанціями, вартість буде знижуватись, якщо буде розвинена технологія виробництва, тобто більші обсяги виробництва забезпечать економію в масштабі. Ще одним аргументом для будівництва саме ММР є більший термін безупинного функціонування, заміна палива проводиться не так часто, як на реакторах великої потужності. Також вони мають кращі регулювальні характеристики, що дає змогу реагувати на зменшення попиту електроенергії в мережі, через їх меншу потужність та покоління реактора [5].

Крім того, у разі потреби нарощування потужності у випадку з ММР це може бути реалізовано без особливих труднощів, адже нові модулі можуть бути збудовані на тому ж майданчику, де вже розміщено попередні, та управлятись з того ж пункту управління, тим самим персоналом, котрий вже є на електростанції.

У ММР використовують нові покоління реакторів, а саме: третього або покращеного третього, що збільшує ефективність та безпечність, робота таких реакторів має початковий встановлений термін 60 років, з можливим продовженням ще на 30-40 років. Дані типи реакторів використовують менше палива, для виробництва тієї ж кількості електроенергії реакторами другого покоління, тобто мають більшу ККД. У порівнянні з існуючими реакторами, запропоновані конструкції ММР загалом простіші, а концепція безпеки для ММР більше покладається властиві реактору характеристики безпеки, такі як низька потужність і робочий тиск, що дає змогу швидше реагувати на можливе неправильне функціонування. Тобто, усувають або значно знижують ризик аварійних викидів радіоактивних матеріалів в навколишнє середовище та впливу на населення та екологію. При будівництві передбачається їх захист від землетрусів, різних зовнішніх чинників, щоб у разі виходу з ладу одного елемента, реактор міг й далі працювати чи самозаглушитися. Можлива також побутова ММР на основі реакторів четвертого покоління, що мають ще кращі робочі характеристики, ніж реактори третього покоління, але на даному етапі такі реактори створені лише у пілотних проектах. В залежності від типу реактора можливе навіть використання ядерних відходів з великих АЕС на ММР, наприклад реактори на швидких нейтронах. Ці реактори використовують спеціальний дизайн, що дозволяє використовувати паливо, яке містить плутоній та інші важкі елементи, які утворюються під час роботи звичайних атомних електростанцій, а також і те паливо, що використовується на великих АЕС. Реактори на швидких нейтронах є більш ефективними в використанні палива, ніж традиційні реактори. Тому тут теж є вибір, який варто буде зробити при розробці ММР.

Дослідимо один з сучасних та ефективних типів ММР – CAREM.

Реактор CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) - це тип малої модульної ядерної установки, розроблений в Аргентині. Цей інноваційний реактор має декілька унікальних особливостей, які роблять його привабливим для використання в різних країнах, зокрема і в Україні.

Один із ключових аспектів реактора CAREM (рис. 1) - його модульна конструкція. Він складається з низки індивідуальних модулів, що дозволяє легко масштабувати його потужність в залежності від потреби. Це дає можливість використовувати реактор CAREM як для великих електростанцій, так і для невеликих місцевих систем енергопостачання [6-7].

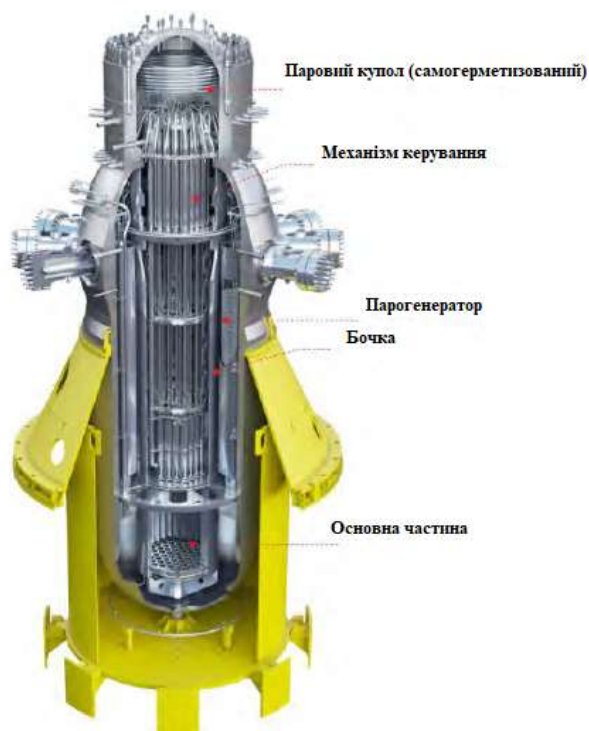


Рисунок 1 – Загальний вигляд ММР типу CAREM

Реактор CAREM використовує технологію охолодження на основі легкої води, що робить його особливо безпечним. Це означає, що реактор може продовжувати працювати під нормальним тиском

та температурою, навіть у випадку відключення системи охолодження. Така конструкція сприяє запобіганню ядерним аваріям і робить реактор CAREM більш стійким до екстремальних ситуацій.

Крім того, реактор CAREM використовує паливо на основі збагаченого урану, що дозволяє досягти високої енергетичної ефективності та зменшити відпрацьоване паливо, яке потрібно обробляти. Це сприяє скороченню радіоактивних відходів та зниженню негативного впливу на довкілля. Основні технічні параметри реактора типу CAREM наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Основні технічні параметри реактора типу CAREM

Параметр	Значення/дані
Розробник технології, країна походження	CNEA, Аргентина
Тип реактора	Інтегральний PWR
Охолоджуюча рідина/сповільнювач	Легка вода/легка вода
Теплова/Електрична потужність, МВт(т)/МВт(е)	100/~30
Первинна циркуляція	Природна циркуляція
Робочий тиск (первинний/вторинний), МПа	12.25 / 4.7
Температура охолоджувача на вході/виході (°C)	284 / 326
Тип палива/комплектація	UO <sub>2</sub> гранульований/шестигранний
Кількість тепловиділяючих збірок в активній зоні	61
Збагачення палива (%)	3.1%
Вигорання при виході з активної зони (ГВт/т)	24
Цикл заправки (місяців)	14
Механізм регулювання реактивності	Тільки механізм приводу штока управління (CRDM)
Підхід до системи безпеки	Пасивна
Розрахунковий термін служби (років)	40
Площа станції (м <sup>2</sup> )	Не відомо
Висота корпусу реактора під тиском (м)	11/3.2
Вага корпусу реактора (метрична тонна)	267
Сейсмічний дизайн/конструкція (величина безпечного землетрусу)	0.25g
Вимоги до паливного циклу чи підходу	390 днів повної потужності та 50% заміни активної зони
Відмінні особливості	Відведення тепла активної зони за рахунок природної циркуляції, герметична оболонка для зниження тиску
Статус дизайну/розробки	На стадії будівництва/створення

Однією з переваг реактора CAREM є його гнучкість у використанні. Він може бути використаний не тільки для виробництва електроенергії, але й для виробництва пари для промислових потреб, а також для виробництва тепла для опалення. Це робить реактор CAREM універсальним інструментом для задоволення різноманітних енергетичних потреб.

#### **Основні особливості конструкції**

CAREM — це реактор непрямого циклу на основі природної циркуляції з технологічними системами, які спрощують конструкцію та підвищують ефективність безпеки. Його первинний контур повністю розташований в корпусі реактора і не потребує жодної зовнішньої частини рециркуляційних насосів. Самогерметизація досягається шляхом збалансування утворення пари та конденсації в посудині без окремого резервуара під тиском. Конструкція CAREM зменшує кількість слабких компонентів і потенційно ризикованих взаємодій з навколишнім середовищем. Основні характеристики конструкції:

- інтегрована система первинного охолодження;
- самогерметизація;
- охолодження активної зони природною циркуляцією;
- внутрішньокорпусні механізми приводу тяг;

- системи безпеки, що спираються на пасивні системи.

CAREM - інтегральний реактор. Його високоенергетична первинна система (реактор, парогенератори, теплоносії першого контуру та паровий купол) містяться в одній ємності, що перебуває під тиском. Первинний потік охолодження досягається природною циркуляцією, яка створюється за рахунок розміщення парогенераторів над реактором. Вода надходить в реактор з нижньої камери. Після нагрівання теплоносії виходить з активної зони і тече вгору через систему трубопроводу до верхнього парового купола. У верхній частині вода виходить системою трубопроводу через бічні вікна назовні. Потім він тече вниз через модульні парогенератори, зменшуючи його ентропію.

Активна зона реактора CAREM-25 має тепловиділяючі збірки гексагонального перетину. У складі є 61 паливна збірка з активною довжиною близько 1,4 метра. Кожна тепловиділяюча збірка містить 108 паливних стрижнів із зовнішнім діаметром 9 мм, 18 направляючих муфт і один контрольно-вимірювальну муфту. Паливо повинно бути на 1,8% - 3,1% збагачене  $UO_2$ . Паливний цикл можна пристосувати до вимог замовника з еталонним проектом для прототипу: 390 днів повної потужності та 50% заміни активної зони.

Реактивність активної зони контролюється за допомогою  $Gd_2O_3$  в окремих паливних стрижнях і рухомих поглинаючих елементах, що належать до системи регулювання та керування. Нейтронна структура в теплоносії не використовується для контролю реактивності під час нормальної роботи та зупинки реактора. Кожен поглинаючий елемент складається з кількох стрижнів, пов'язаних зі структурним елементом («павуком»), тому весь набір стрижнів рухається як єдине ціле. Стрижні поглиначи вставляються в направляючі труби. Абсорбуючим матеріалом є широко використовуваний сплав Ag-In-Cd. Поглинаючі елементи використовуються для контролю реактивності під час нормальної роботи та для відключення, щоб викликати раптове переривання ланцюгової ядерної реакції, коли це необхідно.

В CAREM-25 дванадцять однакових мініспіральних вертикальних парогенераторів прямооточного типу розміщені на рівних відстанях один від одного вздовж внутрішньої поверхні реактора. Кожна складається з системи з 6 згорнутих шарів труб, 52 паралельних труб 26 м активної довжини. Вони використовуються для передачі тепла від первинного до вторинного контуру, виробляючи/створюючи перегріту пару під тиском 4,7 МПа. Вторинна система циркулює вгору по трубах, тоді як теплоносії первинного контуру рухається протитечією. Щоб досягти майже рівномірної втрати тиску та перегріву на вторинній стороні, довжина всіх труб вирівнюється.

Самогерметизація первинної системи в паровому куполі є результатом рівноваги рідина-пара. Великий об'єм пари в корпусі реактора, діючи як невід'ємний компресор, також сприяє демпфуванню (затуханню) будь-яких коливань тиску. Завдяки власному тиску, температура на виході з активної зони відповідає температурі насичення при первинному тиску. Таким чином, типові нагрівачі, присутні в звичайних компресорах PWR (реактори під тиском), усуваються.

Система безпеки CAREM складається з двох систем захисту реактора (RPS), двох систем зупинки, системи пасивного відведення залишкового тепла (PRHRS), запобіжних і розгерметизаційних клапанів, системи впорскування низького тиску та захисної оболонки типу придушення тиску. Дві системи відключення відповідають вимогам незалежності, розділення та диверсифікації та діють автоматично. Перша система відключення (ПЗВ) складається з 9 стрижнів швидкого відключення та 16 стрижнів регулювання та контролю реактивності, розташованих над активною зоною. Вони падають під дією сили тяжіння, коли це необхідно. Друга система відключення полягає в впирскуванні під високим тиском борної води з двох резервуарів під високим тиском, що приводить в дію автоматично при виявленні збою: перша система відключення (FSS). Протягом 36-годинного періоду відведення тепла від розпаду ядра може забезпечити безпечну температуру ядра завдяки наявності одного з двох PRHRS у разі втрати системи відводу або відключення станції (SBO). У CAREM SBO класифікується як проектна ідея. PRHRS — це теплообмінники, утворені паралельними горизонтальними U-подібними трубками (конденсаторами), з'єднаними із загальними колекторами. Набір колекторів з'єднаний з паровим куполом корпусу реактора, тоді як інший комплект (лінія повернення конденсату) з'єднаний із резервуаром на вході з боку первинної системи SG. Завдяки природній циркуляції конструкція забезпечує видалення тепла розпаду ядра, передаючи його до спеціальних басейнів усередині захисної оболонки, а потім до басейну придушення. Два резервних дизельних генератори забезпечують аварійне живлення активних систем охолодження на тривалий термін. Щодо зменшення серйозних аварій, розглядаються положення щодо контролю надходження водню та охолодження нижньої головки

реактора для утримання коріуму в корпусі. Класифікація безпеки систем, конструкцій і компонентів (SSC), важливих для безпеки, базується на ідентифікації функцій безпеки низького рівня (LLSF), отриманих із основних функцій безпеки, і функціональних груп безпеки SSC, які виконують ці функції. Критерії присвоєння категорій безпеки для LLSF і класів для SSC виходять із того, як принцип глибокого захисту впроваджено в проект, а також імовірнісних і детермінованих міркувань. Ця методологія, відповідно до SSG-30 МАGATE, забезпечує чітке призначення правил проектування та вимог до систем, важливих для безпеки, та їх SSC.

Циліндрична герметична ємність з басейном для придушення тиску являє собою залізобетонну зовнішню стінку товщиною 1,2 м із внутрішньою поверхнею вкладиша з нержавіючої сталі та витримує землетруси силою 0,25 g. Він розрахований на тиск 0,5 МПа. Максимальний тепловідвід всередині контейнера (реактора) під час пільгового періоду забезпечує захист від екстремальних зовнішніх явищ.

Природна циркуляція теплоносія створює різну швидкість потоку в первинній системі відповідно до виробленої та видаленої потужності. За різних перехідних процесів потужності виходить самокоригувальна характеристика швидкості потоку. Завдяки самогерметизації RPV (парового купола) система підтримує тиск дуже близький до тиску насичення. За будь-яких робочих умов цього може виявитися достатнім, щоб гарантувати вражаючу стабільність значення тиску корпусного двигуна. Система керування здатна підтримувати тиск у реакторі практично на робочому заданому значенні через різні перехідні процеси, навіть у разі різких змін потужності.

Управління станцією здійснюється за допомогою розподіленої системи керування з високою доступністю (рис. 2). Існує дві різноманітні системи захисту: перша система захисту реактора (FRPS) і друга система захисту реактора (SRPS), кожна система містить чотири резервування. Існує дві різноманітні системи ядерних приладів (NIS), по одній для FRPS і SRPS.



Рисунок 2 - Розташування станції CAREM

### Висновки

ММР – це нова, перспективна технологія виробництва електроенергії. В сучасній ситуації в Україні, з урахуванням всіх подій та чинників, які впливають на структуру виробництва електроенергії, ММР дозволить, по-перше, зменшити ризики екологічної і енергетичної небезпек, по-друге, зменшити втрати при передачі електроенергії, по-третє, збільшить технологічний розвиток України в цілому, розвиваючи нові технології будівництва та покращення функціонування ММР, по-четверте, задовільнить необхідні умови для декарбонізації виробництва електроенергії, використовуючи їх замість ТЕС та ТЕЦ.

Зараз, коли вагома частина ТЕС та ТЕЦ зруйновані або пошкоджені, а на їх відновлення потрібні значні кошти, а також те, що Україні потрібно виконувати умови декарбонізації виробництва електроенергії, можливо та навіть необхідно будувати ММР на їх місці, що на початковому етапі буде давати змогу виконувати ті ж функції, тобто регулювати виробництво електроенергії та її віддачу в мережу, в залежності від необхідного попиту. Також, в майбутньому, можливо повністю

реструктурувати виробництво електроенергії на АЕС, замінивши ті потужності на ММР, аби унеможливити або зменшити ризики енергетичної та екологічної небезпеки.

Оскільки технології ММР інноваційні, то вони не повною мірою відповідають чинним в Україні нормам і правилам. Законодавча та нормативно-правова база України розроблена таким чином, що в країні можна збудувати тільки ядерну установку типу ВВЕР. Усі інші сучасні (зокрема і енергоблоки великої потужності) будуть мати відступи від національних вимог, але при цьому матимуть значно вищі показники безпеки.

Завдяки своїй модульній конструкції, реактор CAREM є більш економічно ефективним порівняно з традиційними великими ядерними електростанціями. Вартість будівництва та експлуатації таких модульних реакторів набагато менше, що робить їх привабливими з економічної точки зору для країн, які мають обмежені ресурси та фінансові можливості. Реактор CAREM також може сприяти розвитку місцевих економік. виготовлення, будівництво та обслуговування модулів реактора може створити нові робочі місця та сприяти технологічному прогресу в енергетичній галузі.

Проте, як і будь-яка інша форма ядерної енергетики, реактор CAREM також стикається з викликами, які вимагають уважного контролю та безпеки. Ефективне управління ядерними відходами, захист від можливих загроз безпеки та міжнародна співпраця є важливими аспектами для успішного використання реактора CAREM та подальшого розвитку ядерної енергетики.

Реактор CAREM представляє собою важливий крок у розвитку ядерної технології, спрямований на забезпечення сталого, безпечного та ефективного постачання енергії. Його модульна конструкція, економічна ефективність та гнучкість у використанні роблять його привабливим варіантом для нашої країни.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копішинська К. О. Сучасний стан та перспективи інноваційного розвитку атомної енергетики України / К. О. Копішинська, І. С. Широкова // Економічний вісник НТУУ «КПІ», 2019. С. 350-359.
2. Режим доступу: [//www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs](http://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs).
3. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to: Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition, Int. At. Energy Agency, Vienna, Austria, 2020.
4. Режим доступу: <https://www.uation.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>.
5. J. Hansen, “‘It’s the future’: How going small may fuel nuclear power’s comeback,” CBC News, Jun. 25, 2019.
6. G. Black, M. A. Taylor Black, D. Solan, and D. Shropshire, “Carbon free energy development and the role of small modular reactors: A review and decision framework for deployment in developing countries,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 43, pp. 83–94, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.011.
7. Режим доступу: <http://dspace.nbuuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/2024/03-Dryapachenko.pdf?sequence=1>.

**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).