

## ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація:** У доповіді розглядається нова технологія ядерної енергетики - малі модульні реактори (ММР), які відрізняються від традиційних атомних електростанцій (АЕС) меншою потужністю, відповідно і розмірами, маневреністю потужностей, пасивною безпекою та можливістю масового виробництва. Проведено аналіз основних характеристик, типів, переваги та недоліки ММР, а також перспективи їх впровадження в Україні та світі.

**Ключові слова:** ММР, реактор, АЕС, SMR-160.

**Abstract:** The report considers a new nuclear power technology - small modular reactors (SMRs), which differ from traditional nuclear power plants (NPPs) in lower power, respectively, size, capacity manoeuvrability, passive safety and the possibility of mass production at enterprises. The author analyses the main characteristics, types, advantages and disadvantages of SMRs, as well as the prospects for their implementation in Ukraine and the world.

**Keywords:** SMR, reactor, nuclear power plant, SMR-160.

### Вступ

Атомна енергетика базується на явищі ядерного поділу, коли атоми важких елементів, таких як уран або плутоній, розщеплюються на менші атоми, вивільняючи велику кількість енергії та нейтронів. Ці нейтрони можуть викликати подальший поділ атомів, створюючи ланцюгову реакцію, яка може бути контрольованою або неконтрольованою. Перші експерименти з ядерним поділом були проведені в 1930-х роках відомими фізиками, такими як Енріко Фермі, Отто Ган, Лізе Мейтнер та Фрідріх Штрассман. У 1942 році Енріко Фермі та його команда досягли першої самопідтримуваної ядерної ланцюгової реакції в експериментальному реакторі під стадіоном Чиказького університету. Це було частиною секретного проекту Мангеттен, який мав на меті створити першу атомну бомбу. Після війни багато країн почали розвивати ядерну енергетику для мирних цілей, таких як виробництво електроенергії, медицина, наука та промисловість. Ядерна енергетика продовжує розвиватися і вдосконалюватися, використовуючи нові технології, матеріали та дизайни. Одним з напрямків розвитку є створення малих модульних реакторів (ММР).

### Результати дослідження

Малі модульні реактори – не нова, але новітня технологія. Реактори малої потужності мають свою історію, яка бере свій початок ще з 40-х років минулого сторіччя. Основна ідея їхнього створення виникла в результаті досліджень та розробок, ініційованих Військово-повітряними силами США, армією та флотом. Найбільш подібний до ММР був реактор, розроблений американською армією в рамках воєнної ядерно-енергетичної програми. Тоді було збудовано вісім реакторів малої потужності. Усі вони розміщувались на однакових по характеристиках майданчиках, які на сьогодні також вважаються перспективними для спорудження ММР [1]. Минулі напрацювання стали основою для створення ММР для задоволення енергетичних потреб світу та зменшення кліматичних змін.

Основною перевагою ММР є саме висока маневреність потужністю, фактично часом досягнення піку потужності та мінімальної, який становить в середньому 27 і 25 хвилин відповідно, в порівнянні з великими АЕС цей час значно перевищує наведений для ММР. Таким чином, не стоїть нагальним питанням заміна саме традиційних АЕС на даному етапі розробок, а заміна маневрених ТЕС/ТЕЦ в енергосистемах країн на більш екологічні ММР. Особливо чітко це помітно в сучасній частці вироблення електроенергії на ТЕС/ТЕЦ в світі, цей показник коливається в межах 43-56%, в порівнянні з АЕС – близько 10%. Час розгортання потужності на ТЕС/ТЕЦ також лежить в межах 20-30 хвилин, тому досить впевнено можна сказати, що за цим показником на даному етапі розробок ММР не поступаються ТЕС.

Майданчики ТЕС вже мають низку готових рішень для переобладнання їх для спорудження малих модульних реакторів. Зокрема, це наявність розподільчого обладнання, власне земельна ділянка з відповідним цільовим призначенням, доступ до водойм та систем зберігання води, які необхідні для охолодження, а також залізничного та автомобільного зв'язків, які дозволять зберегти логістичні ланцюги поставок палива. Також на ТЕС є низка інших систем та будівель, які можна перепрофілювати. Це системи стисненого повітря, хімічні склади, система зберігання технічних газів, системи очищення стічних вод, мобільне підйомне обладнання, адміністративні будівлі тощо. Крім того, на ТЕС вже є кваліфіковані кадри. Звісно ж, їх потрібно буде дещо перекваліфікувати. Але збереження людського потенціалу та робочих місць відіграє важливу суспільну роль, зменшить соціальну напругу у регіоні та підтримуватиме розвиток громад. Тож переобладнання майданчиків ТЕС для спорудження ММР дозволить скоротити капіталовкладення та знизить вартість проекту будівництва атомних електростанцій [2].

Вагомим показником переваги ММР є також і термін експлуатації та фактичне перевищення терміну експлуатації наявних в Україні реакторів. На сьогодні термін експлуатації більшості енергоблоків виходить у 2020-2030-х роках, тому варто вже зараз будувати нові потужності, аби запобігти дефіциту електроенергії в країні. ММР можуть бути вдалою альтернативою для заміни застарілих реакторів, оскільки вони мають довший термін служби. Крім того, ММР можуть бути інтегровані в існуючі енергетичні мережі, забезпечуючи стабільність та гнучкість енергопостачання.

Усе залежить від проекту, проте можливо досягти великого термін експлуатації – 40-80 років [3]. Діючі реактори мають максимальний термін експлуатації – 40-50 років, а ММР будуть практично в 1,5 рази мати більший час використання і це враховуючи те, що вони будуть маневрувати, і близько в 2 рази більший час використання, якщо кількість зміни потужностей буде мінімізована, тобто використовуватиметься лише для заміни палива, фактично генерувати базову потужність.

Звісно, безпека є головним фактором роботи таких об'єктів. Вона є найвищим пріоритетом в Україні і тільки після підтвердження безпечності технології розглядаються усі інші фактори, зокрема й економічний. Малі модульні реактори є більш безпечними, у тому числі, за рахунок пасивних систем безпеки. Це означає, що навіть у разі ядерної зими, коли людина не зможе бути присутньою на блочному щиті управління реактором, не матиме змоги здійснювати нагляд та контроль за станом енергоблока, системи безпеки самостійно, без участі людини, переведуть реактор у безпечний стан. Подібні системи безпеки знижують ризики виникнення важких ядерних аварій [1].

Позитивною характеристикою також є менші розміри в порівнянні з традиційними реакторами, це надає дуже велику свободу при встановленні ММР, фактично їх можна розміщувати в регіонах з обмеженим доступом для побудови транзитних ліній електропередачі для забезпечення електроенергією споживачів і в найвіддаленіших регіонах, фактично створювати «енергоострови». Як впливає із загальної логіки, найбільша потужність ММР становить 300 МВт, а традиційних реакторів – 1100 МВт, тобто втричі менша, а відповідно і витрати на будівництво окремого ММР будуть менші. Хоча з економічної точки зору вартість виготовлення ММР на одиницю встановленої потужності буде дещо вищим ніж у традиційних. Цей фактор нівелюється тим, що буде досягнута більша екологічна безпека у разі аварій, трагічний досвід яких вже відомий Україні та декільком країнам у світі.

Варто зазначити, що витрати на будівництво традиційних АЕС значно зростають в ході будівництва, яке триває близько 10 років та може дещо продовжуватись, через ряд обставин, що не виключено і по відношенню до ММР, але враховуючи менші потужності одного такого реактора та терміну будівництва, навіть у разі невдачі не призведе до великих економічних збитків. Як показують дослідження вартість спроектованих ММР зростають, що робить їх дещо нерентабельними в порівнянні з наявними реакторами встановленими на сучасних АЕС. Варто зазначити, що на даному етапі важливо розглядати ММР, як заміну ТЕС, а в порівнянні з ними економічні показники, які включають багато факторів, серед яких вартість не лише будівництва, а і експлуатації та терміну служби, робить їх більш перспективними.

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 [4].

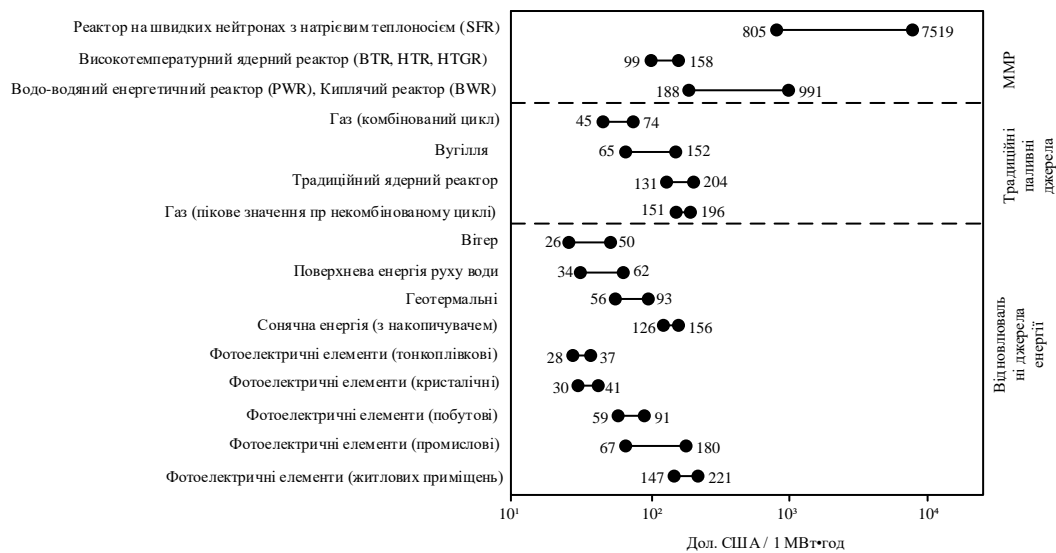


Рис. 1 - Порівняння питомої вартості електроенергії в доларах США на 1 МВт·год

Важливо те, що хоч і ММП та АЕС працюють на радіоактивному паливі, радіаційний фон поблизу ТЕС є вищим, ніж на АЕС, тому впровадження ММП замість вже існуючих ТЕС, також позитивно вплине на екологію та стан здоров'я персоналу станції. Ще одним позитивним фактором для будівництва ММП на заміну ТЕС чи доповнення до АЕС можна зазначити меншу площу території необхідної для будівництва всіх необхідних приміщень та установок.

Якщо традиційний реактор займає площу близько 400 тис м<sup>2</sup>, то ММП – 40 тис м<sup>2</sup> [2]. Міненерго має амбітні цілі розмістити 20 малих реакторів SMR-160 американської компанії Holtec International замість пошкодженої теплової генерації. За два роки планують провести ліцензування і побудувати пілотний блок, ще за три – розмістити два десятки нових модульних реакторів [5].

Holtec International, яка і розробила дану модель реактора вже доволі давно працює на українському ринку і загалом є досить відомою у світі компанією. Зазначимо, що раніше ця ж компанія запровадила чотири нові проекти в Україні, що стосуються саме атомної енергетики.

SMR-160 - це малий модульний реактор з легкою водою під тиском, який генерує 160 MW. Суттєвим відмінністю конструкції є її абсолютна безпека, яка є важливою для отримання державної підтримки та схвалення регуляторних органів для різноманітних застосувань та розподіленого виробництва [6].

Таблиця 1 - Основні технічні показники SMR-160

Технічні показники	
Тип реактора	PWR (Водо-водяний ядерний реактор)
Теплоносій/сповільнювач	Легка вода / Легка вода
Номінальна потужність (теплова/електрична)	525 МВт / 160 МВт
Тип циркуляції теплоносія	Природна циркуляція
Тиск первинного контуру	15,5 МПа
Втрати первинного контуру	3,8 · 10 <sup>6</sup> кг/год
Тиск вторинного контуру	3,4 МПа
Втрати вторинного контуру	7 · 10 <sup>5</sup> кг/год
Тип палива/тип ТВЕЛ	UO <sub>2</sub> / квадратна решітка
Максимальний відсоток збагачення палива	4,95%
Кількість ТВЗ	112
Тривалість циклу однієї заправки паливом (в місяцях)	18 – 24
Використання встановленої потужності	95%
Метод керування зміною потужності	Рух хрестоподібних регулюючих стрижнів
Термін експлуатації (в роках)	80-100

В даній моделі і є наведені всі технічні та технологічні показники розглянуті раніше. А саме можливість виготовлення всіх конструктивних елементів SMR-160 в автоматизованому порядку на заводах-виробниках, що полегшить та здешевить вартість виготовленого обладнання на протипагу індивідуального виготовлення кожного елемента для сучасних АЕС. Також можлива доставка до місця збору значно полегшиться через невеликі розміри і можливість доставки вантажівками практично в будь-який куточок світу.

Проектний термін експлуатації такого реактора 80-100 років. Терміни будівництва – 2-3 роки [7]. У цьому відношенні можливо розпочати швидке будівництво одразу декількох таких установок, що є більш привабливим і з економічної, і з технологічної точки зору, в порівнянні з великими блоками сучасних типів АЕС.

На відміну від сучасних експлуатаційних установок, даний тип реактора спроектований таким чином, що вся охолоджуюча вода, яка необхідна для безпечного відключення станції, навіть при найсерйозніших аваріях, є невід'ємною частиною установки і розміщена таким чином, щоб запобігти перегріву реактора. Оскільки система безпеки станцій, що мають доступ до системи подачі охолоджуючої води SMR-160, є пасивною, тобто вона працює виключно під дією сили тяжіння для забезпечення відведення відпрацьованого тепла, що утворюється в результаті роботи реактора.

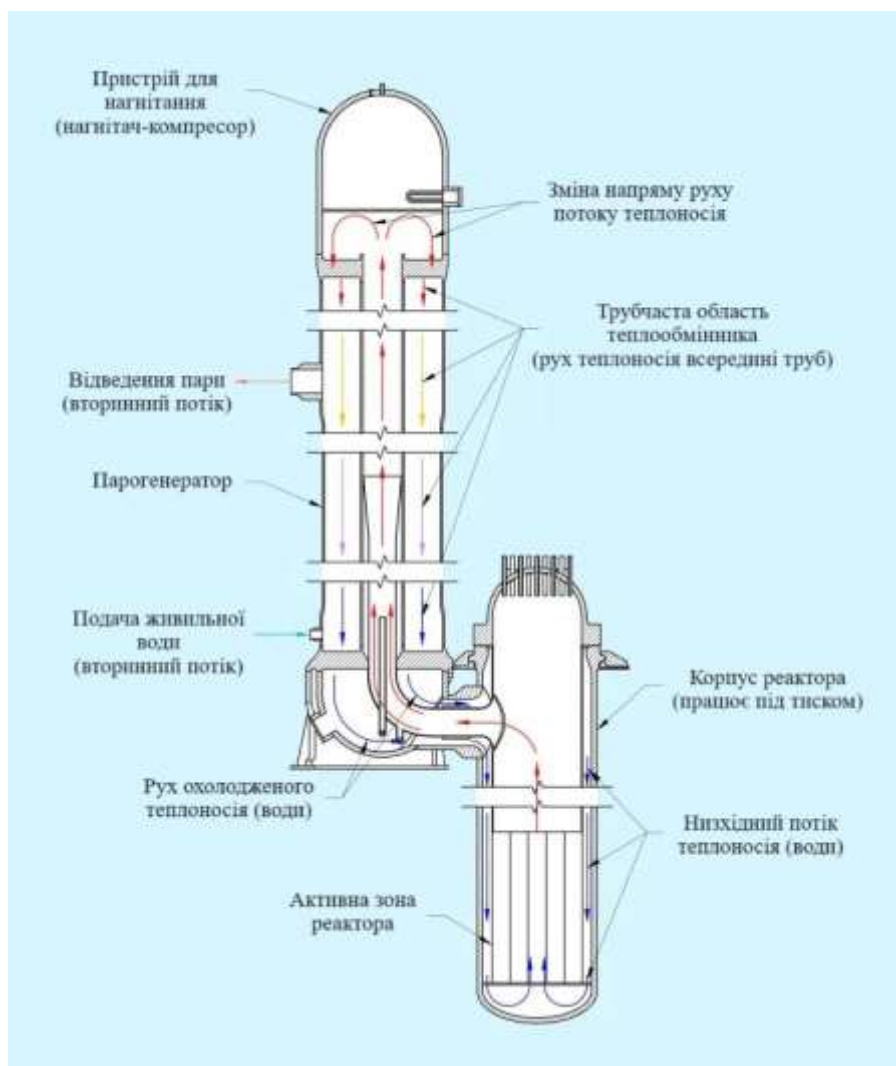


Рис. 2 - Загальний вигляд та складові реактора SMR-160

Реактор створений на основі вже існуючої технології водо-водяного реактора, який є найбезпечнішим з існуючих. Важливим елементом є ступінь автоматизації даного реактора, так як реагування на проектні аварії не потребують втручання оператора для її усунення, що дає змогу виключити людський фактор і зменшує ймовірність невірних дій оператора в аварійних ситуаціях, підкріплених можливим стресом у даній ситуації. Тривалість роботи одного циклу завантаженого палива має досить великий термін від півтора року до двох, він здебільшого буде залежати від типу експлуатації, тобто від роботи в різних режимах навантаження, при великих кількостях регулювання термін експлуатації не повинен перевищувати півтора року.

Активна зона реактора розташована нижче рівня ґрунту, що зменшує вплив можливих зовнішніх загроз. Захисна оболонка складається з залізобетонної оболонки товщиною близько двох метрів, що зсередини містить вставку металічної герметичної оболонки товщиною близько чотирьох сантиметрів. Весь радіоактивний вміст знаходиться всередині цієї оболонки, що розміщений до того ж нижче рівня ґрунту, як і резервуар зі збереження відходів, що містить більшу товщину близько трьох метрів, що з розташованими каналами для охолодження збільшує безпеку даного об'єкту.

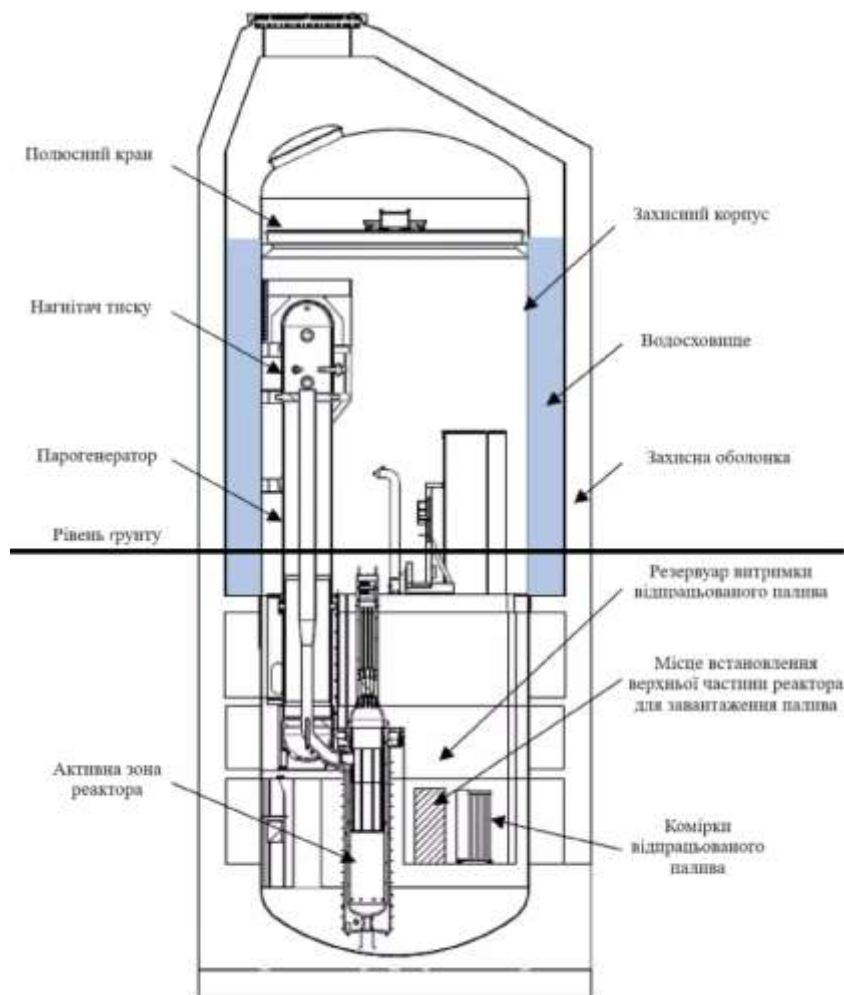


Рис. 3 - Реакторний відділ

Система контролю та керування створена Mitsubishi Electric Company, містить розділену інтегровану систему управління та автоматизації з можливістю доповнення та навіть докорінного перезапису кодів керування роботою реактора. Як зазначалось вище в разі аварійних ситуацій дана система автоматично буде виведення в режим відповідного аварійного керування, що не потребує втручання персоналу. Дана система вже працює на декількох енергетичних та не тільки об'єктах та доволі добре зарекомендувала себе, особливо в ситуаціях близьких до аварійних. В конструкції реактора закладено декілька систем охолодження, що в їх поєднанні зумовлює підвищення рівня безпеки енергетичного об'єкту. До неї входять такі системи охолодження як: система первинного,

вторинного охолодження, система автоматичного скиду води при перевищенні тиску вище допустимого рівня, система пасивного водозабору активної зони.

### Висновки

Впровадження нової технології – це великий виклик не лише для України, а й для світу. Для України в даній ситуації російської агресії важливо бути енергетично незалежними та забезпечити стабільну роботу енергосистеми у будь-який час. Будівництво та введення в експлуатацію нової технології ММР потребує залучення великих інвестицій у економіку нашої країни, так як в період війни важко, та навіть неможливо буде знайти такі кошти з власних надходжень. Потрібно також забезпечити необхідну правову базу для роботи таких об'єктів та врегулювання питання інвестицій в цей сектор енергетики, адже ядерна безпека є ключовою вимогою для створення таких амбітних проєктів. Також необхідно створити виробництво деталей до ММР саме в Україні, що збільшить інтерес інших країн до інвестицій та здешевить вартість побудови для нашої держави. Збільшуючи встановлену потужність виробництва електроенергії, в нас буде можливість експортувати її закордон в періоди її надлишку, що ще й збільшить термін експлуатації ММР та тривалості роботи одного циклу завантаженого палива, адже кількість змін потужності в широких межах зменшиться.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Що таке малі модульні реактори, будівництво яких розглядає Україна. Режим доступу URL: <https://biz.censor.net/resonance/3403084/scho-take-mali-modulni-reaktory-budivnytstvo-yakih-rozglyadaye-ukrayina>
2. Малі модульні реактори як альтернатива ТЕС: чисто, маневрово, ефективно. Режим доступу URL: <https://infoatom.news/2023/01/06/060120231211>
3. Міні-АЕС для України: чи врятують країну малі модульні реактори, про які згадував Зеленський. Режим доступу URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/11/18/693990/>
4. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ТИПУ CAREM. Режим доступу URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/18531/15357>
5. Міненерго хоче побудувати 20 малих ядерних реакторів. Цю технологію ще не реалізував ніхто у світі. Скільки вона може коштувати. Режим доступу URL: <https://forbes.ua/company/minenergo-khoche-pobuduvati-20-malikh-yadernikh-reaktoriv-tsyu-tekhnologiyu-shche-ne-realizuvav-nikhto-v-sviti-skilki-vona-mozhe-koshuvati-24032023-12541>
6. Малий модульний реактор Holtec SMR-160 після 10 років розробки, вступає в процес ліцензування USNRC. Режим доступу URL: <http://www.atomforum.org.ua/news/2020/malij-modulnij-reaktor-holtec-smr-160-pislya-10-rokiv-rozrobki-vstupaye-v-proces-li-cenzuvannya-usnrc>
7. Нові реакторні технології: реалії та перспективи. Режим доступу URL: <https://www.uatom.org/2020/07/24/novi-reaktorni-tehnologiyi-realiyi-ta-perspektivi.html>

**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).