

# Гібридні енергетичні системи із джерелами ядерної та відновлювальної енергетики: огляд міжнародного досвіду та поточний стан

## ■ Дарибогов Микита Максимович

Відокремлений підрозділ «Центр інновації в ядерних технологіях для безпечного майбутнього» Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Славутич, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8267-5778>

## ■ Дибач Олексій Михайлович, канд. техн. наук

Відокремлений підрозділ «Центр інновації в ядерних технологіях для безпечного майбутнього» Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Славутич, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1807-8514>

Ядерна та відновлювальна енергетика є низьковуглецевими джерелами енергії. Частка відновлювальних джерел енергії у структурі енергосистем зростає, що вимагає додаткових маневрових потужностей та призводить до зниження ефективності експлуатації енергогенеруючих потужностей, які працюють в базовому режимі. Маневрування потужністю забезпечується проєктними рішеннями в сучасних проєктах атомних станцій (зокрема малих модульних реакторів) та в обмеженому обсязі може бути досягнуто завдяки модифікації діючих АЕС. Актуальним завданням є оптимізація спільної роботи ядерних та відновлювальних енергогенеруючих потужностей із урахуванням їх особливостей для досягнення оптимальних техніко-економічних показників енергосистем.

У статті наведено огляд актуальних міжнародних досліджень та поточний стан впровадження гібридних енергетичних систем із джерелами ядерної та відновлювальної енергетики. Запропоновано визначення терміну «гібридна енергетична система» та наведено огляд програмних засобів для розв'язання задач моделювання і оптимізації ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, гібридна енергетична система, оптимізація, програмний засіб, ядерна енергетика.

© Дарибогов М. М., Дибач О. М., 2022

## Вступ

Декарбонізація енергетичного сектора є необхідною умовою для досягнення кліматичних цілей, визначених Паризькою кліматичною угодою [1]. Це зумовлює зміни в структурі енергетичних систем, які полягають у поступовому заміщенні вуглецевих джерел енергії (вугілля, нафта) джерелами енергії із низьким викидом вуглекислого газу (ядерна енергетика, відновлювальні джерела енергії

(ВДЕ)). Розвитку низьковуглецевих джерел енергії в Євросоюзі також сприяє надання їм преференцій у фінансуванні («таксономія»). У лютому 2022 року Єврокомісія внесла ядерну енергетику до переліку «зелених» джерел енергії, що підвищує її інвестиційну привабливість [2].

Сучасні енергосистеми характеризуються збільшенням частки ВДЕ, здебільшого сонячною та вітровою складовими [3]. ВДЕ властива непостійність (змінність) електрогенерації, яка залежить від метеорологічних умов. Зростаюча частка

ВДЕ значно ускладнює диспетчеризацію енергосистем та вимагає наявності маневрових потужностей [4]. Іншим аспектом є недовироблення електроенергії джерелами енергії, які несуть базове навантаження, в разі їх використання як маневрових потужностей для компенсації зміни електрогенерації ВДЕ [5].

Для підвищення ефективності та стійкості сучасних енергосистем у США та європейських країнах ведуться дослідження щодо побудови так званих гібридних енергетичних систем [4], [6]. Гібридні енергетичні системи характеризуються більшою стійкістю та вищими економічними показниками, що досягається завдяки оптимальному балансуванню різних джерел енергії та виробленню додаткових до електроенергії продуктів – генерація водню, використання електроенергії для дата центрів та інше [7].

У цій статті досліджується визначення та склад гібридної енергетичної системи, утвореної з ядерних та відновлювальних енергогенеруючих потужностей, – так звана ядерно-відновлювальна гібридна енергетична система (Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems, N-R HES). Мета статті полягає в огляді сучасних міжнародних досліджень щодо ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем.

**Поточний стан досліджень та визначення ядерно-відновлювальної гібридної енергетичної системи пакета кодів**

Синергія ядерної та відновлювальної енергетики є актуальною науковою задачею, яка є предметом досліджень у міжнародних наукових та проєктних інституціях за такими напрямками:

поєднання та спільна робота інноваційних ядерних технологій, зокрема малих модульних реакторів (ММР), та ВДЕ [8]-[10];

розрахунок економічних показників перспективних ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем [11]-[15];

маневреність ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем та оптимальний баланс її складових [16]-[18].

Розвиток технології ММР дає змогу значно знизити вимоги до надійності з'єднань АЕС з енергосистемою, водночас різко підвищуючи маневрені характеристики ядерної енергетики. Сумісне використання технології ММР, ВДЕ та акумуляторів енергії в одній інтегрованій енергетичній системі є предметом сучасних міжнародних [8] та вітчизняних досліджень [10].

Зокрема, дослідження NuScale Power™ щодо спільної роботи ММР NuScale VOYGR із вітровою електростанцією «Horse Butte» (HBWF) на майданчику Національної лабораторії Айдахо (Idaho National Laboratory (INL), США), результати якого наведено у звіті [8], є пілотним проєктом у вивченні можливості синергії між технологіями ядерної та відновлювальної енергетики. Проєкт ММР NuScale VOYGR задовольняє вимоги Науково-дослідного інституту електроенергетики (Electric Power Research Institute, EPRI, США) щодо маневрових характеристик ММР [19]:

- 24 годинний цикл: 100 % > 20 % > 100 %;
- швидка зміна потужності 40 % за годину;
- можливість автоматичного регулювання частоти;
- крокова зміна потужності 20 % за 10 хв.;
- допустимість відхилень частоти.

На рисунку 1 зображено гіпотетичний сценарій для демонстрації інтеграції ММР NuScale VOYGR з вітряною електростанцією HBWF в одну енергосистему, зокрема зображено графіки: середньодобового попиту на електроенергію в США з типовими ранковими та вечірніми піками; фактичної електрогенерації HBWF (на прикладі доби в листопаді 2014 року); зміни потужності одного модуля NuScale.



Рисунок 1 – Приклад маневреності ММР NuScale VOYGR для компенсації добової зміни генерації від вітрової електростанції HBWF [8]

На рисунку 2 наведено приклади як MMP NuScale VOYGR може забезпечити попит електроенергії. В одному випадку, показаному у верхній частині рисунка, зміна потужності модуля MMP NuScale VOYGR є результатом байпасу турбіни без зміни потужності реактора. Інший підхід полягає в маневруванні потужністю реактора модуля і частковим байпасом турбіни для забезпечення балансу навантаження. Цей сценарій має переваги, оскільки зменшує як кількість втраченої енергії, так і циклічність обладнання для перетворення електроенергії. Однак, диспетчер повинен мати точний прогноз вітрової потужності та оператору має бути дозволено коригувати потужність модуля за потребою. Безпека маневрового режиму роботи MMP NuScale VOYGR забезпечується проектними рішеннями та обґрунтовується у звіті з аналізу безпеки MMP.

Проаналізована NuScale Power™ спільна робота ядерних та відновлювальних джерел енергії демонструє переваги такої системи. Водночас може бути вирішена оптимізаційна задача з використанням надлишків електровиробництва АЕС (зокрема MMP) для отримання додаткових продуктів (наприклад, для генерації водню) із забезпеченням відповідності безпеки АЕС регулюючим вимогам з ядерної та радіаційної безпеки.

Міністерство енергетики США (United States Department of Energy (DOE)) визнає необхідність трансформації енергетичної інфраструктури США у системи, які можуть значно зменшити вплив на довкілля ефективним та економічно вигідним способом, використовуючи як «зелені» джерела виробництва енергії, так і інші види генерації [6]. Концепція, сформована спільно відділом ядерної енергетики та відділом енергоефективнос-

ті і відновлювальної енергетики DOE, полягає в тісному поєднанні ядерних і відновлювальних джерел енергії для генерації електроенергії та напрацювання інших продуктів промислового виробництва та транспортної галузі. Цю концепцію називають «гібридною системою». Така гібридна система об'єднує два або більше енергетичні джерела для виробництва двох або більше продуктів, один з яких – електроенергія [20]. Це визначення передбачає об'єднання різних генеруючих потужностей, за якого потоки енергії динамічно розподіляються відповідно до потреби. Дослідженнями ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем займаються Національна лабораторія з відновлювальних джерел (National Renewable Energy Laboratory (NREL)) та INL, які підпорядковуються DOE [7], [11]-[15]. Проводяться дослідження на лабораторному стенді INL DETAIL (Dynamic Energy Transport and Integration Laboratory), на якому аналізуються можливості для подолання технічних та економічних бар'єрів, які обмежують більш широке використання ядерної та відновлювальної енергії в інтегрованих енергетичних системах [21].

У відповідь на зростання зацікавленості держав-членів Міжнародного агентства з ядерної енергії (МАГАТЕ) у впровадженні гібридних енергетичних систем, агентством у 2018 році було проведено Технічну нараду з ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем для виробництва декарбонізованої енергії та когенерації. На цій нараді були презентовані новітні інноваційні концепції, що стосуються проблем використання комбінації ядерних та відновлювальних джерел енергії. Загалом у нараді взяли участь 24 учасники із 17 країн та представники міжнародних організацій.

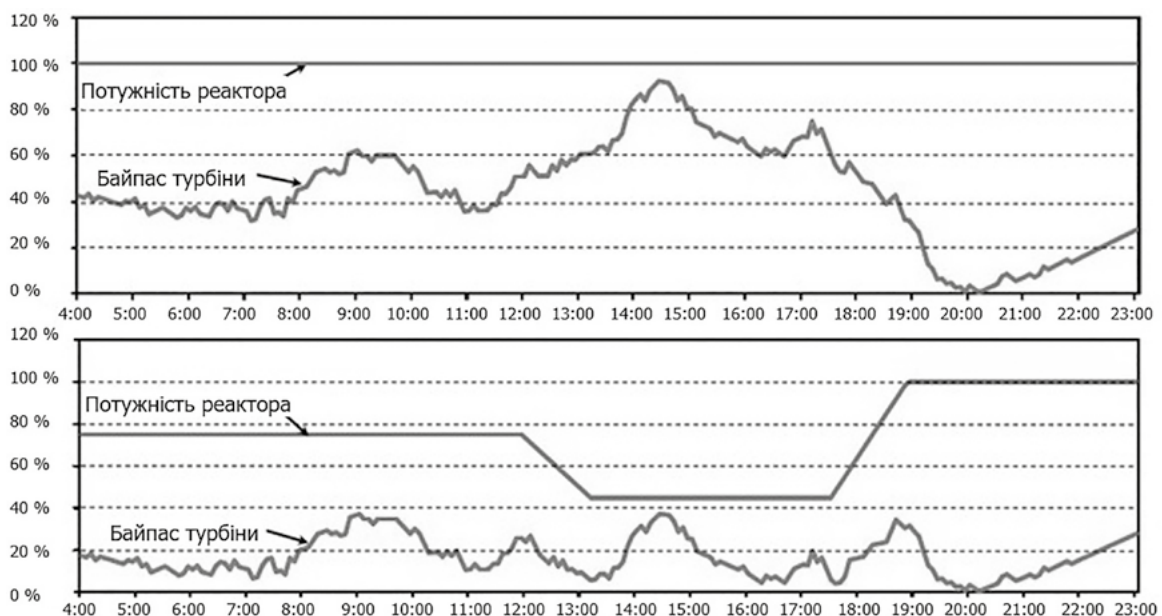


Рисунок 2 – Маневрування потужності модуля MMP NuScale VOYGR: байпас турбіни (верхній графік), комбінація зміни потужністю реактора та байпаса турбіни (нижній графік) [8]

За результатами наради розроблений технічний документ серії TECDOC – IAEA-TECDOC-1885 [22], основою якого є матеріали статей і резюме технічних та дискусійних сесій, а також висновки та рекомендації наради. У цьому документі [22] акцентується увага на безумовному дотриманні вимог з безпеки та реалізації принципу «культура безпеки» під час впровадження ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем.

Для продовження досліджень за цією тематикою МАГАТЕ ініційовано координаційний дослідницький проєкт (CRP) CRP I32012 «Technical Evaluation and Optimization of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems» («Технічна оцінка та оптимізація гібридних енергетичних систем із джерелами ядерної та відновлювальної енергетики») [23] зі строком виконання з 2022 по 2026 роки. Дослідницький проєкт об'єднує поточний стан знань щодо моделювання, аналізу, оптимізації та потенційного впровадження ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем. Метою проєкту є технічна оцінка та оптимізація варіантів скоординованого використання ядерної і відновлювальної енергії та їх тісної інтеграції в гібридні енергетичні системи для задоволення поточних і майбутніх національних та регіональних енергетичних потреб, а також сприяння міжнародному співробітництву держав-членів МАГАТЕ.

Ознайомившись з міжнародними джерелами досліджень можна зазначити, що усталеного визначення терміну «ядерно-відновлювальна гібридна енергетична система» ще не прийнято. З урахуванням міжнародного досвіду пропонується використовувати таке визначення: «ядерно-відновлювальна гібридна енергетична система – це енергетична система із динамічно розподіленими потоками енергії (теплової та електричної), у складі якої є ядерні генеруючі потужності та ВДЕ,

а також виробляється два і більше продуктів, один з яких – електроенергія відповідно до потреб електромережі».

### Складові ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем

Склад ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем може варіюватися залежно від цілей енергосистеми та наявних енергогенеруючих потужностей. Основні складові згідно з [6] наведені на рисунку 3.

**Ядерний реактор.** Ядерний реактор, як складова ядерної енергетичної установки, забезпечує базове навантаження теплової та електричної енергії. В гібридній енергосистемі тепла енергія може розподілятися між потребами промислового процесу (наприклад, виробництво водню), теплоаккумулятора та генератором електроенергії (парова турбіна) залежно від попиту мережі та економічних показників.

**Генератор електроенергії.** Парова турбіна в підсистемі виробництва електроенергії перетворює теплову енергію, вироблену в ядерному реакторі, в електричну. Парова турбіна є елементом ядерної енергетичної установки, але виділяється як окрема структурна складова ядерно-відновлювальної гібридної енергетичної системи, через те, що теплова енергія від реактора може байпасувати турбіну і направлятися на інші потреби, крім електрогенерації.

**Відновлювальні джерела енергії.** ВДЕ забезпечують чисту електрогенерацію для потреб мережі з низькими витратами. Втім електричні станції на основі ВДЕ не можуть забезпечити постійне виробництво та потребують резерву потужності, роль якого в гібридній системі виконує ядерна енергетична установка.



Рисунок 3 – Принципова схема ядерно-відновлювальної гібридної енергетичної системи [6]

**Промисловий процес.** Під час інтеграції в ядерно-відновлювальну гібридну енергетичну систему промисловий процес отримуватиме тепло та/або електроенергію від ядерного реактора і ВДЕ для задоволення потреб електромережі. Енергія використовується для виробництва додаткових промислових продуктів, які забезпечать додатковий потік прибутку для оператора. У разі, коли вся кількість теплової енергії від ядерного реактора спрямовується на виробництво електроенергії, тепло, необхідне для промислового процесу, може бути забезпечене теплоаккумуляторами або отримане з іншого джерела енергії за необхідності неперервної роботи промислового процесу. Прикладами промислового процесу можуть слугувати: виробництво водню, зрідження природного газу, знесолення води, виробництво хімікатів, металургія тощо.

**Акумулятор (електричний, тепловий).** Варіантами зберігання електроенергії є лужні та кислотні акумулятори й інші технології акумуляування електроенергії. Зокрема інноваційну технологію Power-to-Gas, у разі застосування якої надлишок електроенергії в години з малим її споживанням, використовують для розщеплення води на водень і кисень за допомогою електролізу. Водень, зі свого боку, з діоксидом вуглецю синтезують в метан, який можна використовувати як паливо для газових електричних станцій [24]. Варіанти зберігання теплової енергії передбачають як рідку, так і тверду форми. Тепло, вилучене з теплоаккумулятора, може використовуватися або безпосередньо в промисловому процесі, або для виробництва електроенергії.

Зазначена конфігурація дозволяє отримати такі переваги:

- балансування енергосистеми та задоволення потреб в електричній енергії за оптимальної конфігурації енергогенеруючих джерел енергії;

- компенсація непостійного режиму ВДЕ ядерною енергетикою;

- зменшення викидів парникових газів від енергетичного та промислового секторів;

- оптимізація цін на електроенергію за високої частки генерації з ВДЕ, перенаправленням потоку енергії з електрогенерації на промисловий процес у разі відсутності потреби у мережі [11].

Узагальнений алгоритм експлуатації та диспетчеризації ядерно-відновлювальної енергетичної системи наведено на рисунку 4 [16]. Як приклад промислового процесу наведено виробництво водню для використання як екологічного палива в транспортних засобах або для зберігання енергії за технологією Power-to-Gas [13], [14], [24].

Першочерговою задачею диспетчеризації ядерно-відновлювальної енергетичної системи є задоволення потреб мережі в електроенергії. Якщо ВДЕ не можуть повністю забезпечити потребу, то ядерна енергетична установка працює в режимі вироблення електроенергії в мережу. Над-

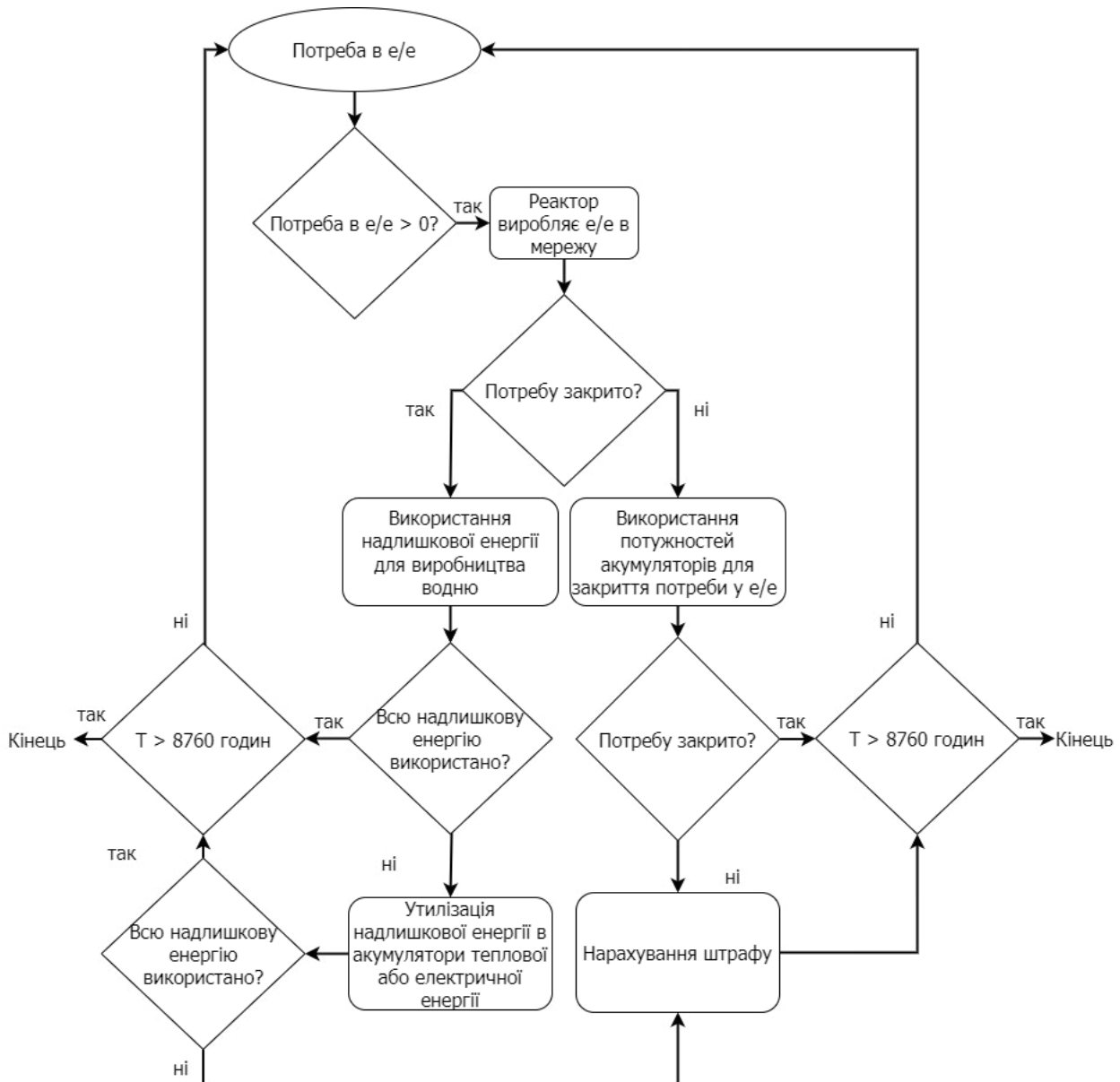
лишкова енергія (теплова чи електрична) направляється на виробництво водню методами низько-, середньо- або високотемпературного електролізу води. Невикористана енергія на потреби мережі та виробництва водню зберігається в акумуляторах. Коли спільної роботи ВДЕ та ядерної енергетичної установки недостатньо для забезпечення потреб мережі в електроенергії, то використовуються потужності акумуляторів. Такий алгоритм дійсний протягом року і його виконання динамічно змінюється відповідно до вхідних умов.

### Програмні засоби для моделювання та оптимізації гібридних енергетичних систем

Моделювання гібридної енергетичної системи є комплексною задачею, яка вимагає моделювання сукупності фізичних процесів (ядерно-фізичні, теплогідрравлічні, системи диспетчеризації тощо). Проблема моделювання енергосистем з великими частками ВДЕ полягає в необхідності розв'язування комплексу взаємопов'язаних задач, зокрема задач диспетчеризації. Крім того, оптимізація енергосистеми потребує виконання аналізу економічних показників розподілення ресурсів на генерацію електроенергії в мережу чи на промисловий процес. Для розв'язання вищезгаданих задач необхідне застосування розрахункових кодів для моделювання енергосистем. Далі розглянемо окремі програмні засоби, які відповідно до міжнародної практики потенційно можуть бути використані для моделювання гібридних енергосистем чи оцінки їх параметрів.

Розрахунковий код NEST (Nuclear Energy System Economics Support Tool), який є частиною бібліотеки розрахункових кодів MAGATE, дозволяє порівнювати економічні характеристики АЕС із ВДЕ. NEST можна використовувати для розрахунку таких характеристик, як загальні капітальні витрати (ONT) та нормована вартість електроенергії (LCOE), а також фінансові показники ефективності, включно з рентабельністю інвестицій (ROI), внутрішніми нормами прибутку (IRR) та чистою поточною вартістю (NPV). Розрахунки можуть бути виконані для різних умов ядерного паливного циклу, включно з поводженням з відпрацьованим ядерним паливом. NEST було розроблено як частину оцінки сталості ядерної енергетичної системи MAGATE (NESA) для забезпечення економічного аналізу за методологією INPRO (Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) [25].

Інший програмний засіб MAGATE – MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) поєднує різні технології для побудови так званих «енергетичних ланцюгів», що дозволяє відображати потоки енергії від пропозиції (видобуток ресурсів) до попиту (енергетичні послуги). Програмний засіб призначений для розробки довгострокових стратегій за



Примітка. e/e – електроенергія

Рисунок 4 – Алгоритм диспетчеризації ядерно-відновлювальної гібридної енергетичної системи

допомогою аналізу оптимального балансу енергоресурсів в енергосистемі, інвестиційних потреб та інших витрат на нову інфраструктуру, безпеки енергопостачання, використання енергетичних ресурсів, темпів впровадження нових технологій та екологічних обмежень [26].

У 2021 році МАГАТЕ анонсовано розробку програмного засобу FRAMES (Framework for the Modelling of Energy Systems). Цей аналітичний інструмент дозволяє розрахувати оптимальну інтеграцію в мережу сучасних ядерних технологій, як-от ММР, мікрореактори, швидкі реактори тощо, а також неелектричне застосування ядерної енергії. FRAMES перебуває в стадії розробки, але вже використовується в МАГАТЕ для пілотного аналізу енергетичних систем [27].

Одним із найбільш пристосованих програмних засобів для моделювання та оптимізації ядерно-відновлювальних гібридних енергетичних систем є комп'ютерний код – RAVEN (Risk Analysis and Virtual Environment), розроблений INL. RAVEN використовується як середовище для інших програмних засобів, забезпечуючи моделювання робочих процесів для оптимізації, генерування набору статистичних даних та розрахунку, використовуючи інші програмні засоби, які інтегруються в оптимізаційну модель [15]-[18].

Усі дії з моделювання структурних елементів ядерно-відновлювальної енергетичної системи виконуються за межами RAVEN з використанням мови програмування Modelica із відкритим вихідним кодом у середовищі розробки Dymola [18].

Для оцінки економічних параметрів застосовується процедура оптимізації з варіюванням різних параметрів системи для отримання мінімальної вартості виробництва електроенергії. На рисунку 5 показана структурна схема програмної основи для моделювання та оптимізації гібридної енергетичної системи [18]. Програмний засіб RAVEN розв'язує оптимізаційну задачу, змінюючи вхідні параметри в моделі системи, запускає модель системи Modelica, обробляє вихідні дані з Modelica та визначає наступний крок оптимізації. Блоки функціональних макетів моделі (functional mock-up unit, FMU) на рисунку 5 є структурними одиницями моделі в термінології Modelica.

### Висновки

Гібридні енергетичні системи із джерелами ядерної та відновлювальної енергетики є актуальною тематикою міжнародних досліджень. МАГАТЕ започатковано координаційний дослідницький проєкт CRP I32012 «Technical Evaluation and Optimization of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems» [23], до реалізації якого залучені фахівці Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки».

Гібридні енергетичні системи в перспективі дозволять підвищити техніко-економічні показники та надійність енергосистем, забезпечуючи маневрування потужністю для компенсації непостійної електрогенерації від ВДЕ. У разі використання АЕС (діючих та нових проєктів АЕС, зокрема MMP) для

маневрування потужності в енергосистемі, може бути вирішена оптимізаційна задача використання надлишків електровиробництва АЕС для отримання додаткових продуктів (наприклад, для генерації водню, роботи дата центрів тощо). Зауважимо, що реалізація гібридних енергетичних систем можлива за безумовного дотримання вимог з ядерної та радіаційної безпеки. Забезпечення безпеки АЕС у складі ядерно-відновлювальних енергетичних систем має бути домінуючим фактором в алгоритмі диспетчеризації системи та відповідати принципу «культура безпеки».

Зважаючи на структуру Об'єднаної енергетичної системи України та зростаючу частку ВДЕ, впровадження гібридних ядерно-відновлювальних енергетичних систем є актуальним і для України.

За результатами огляду міжнародного досвіду, визначено попередній перелік програмних засобів для моделювання енергосистем: NEST, MESSAGE, FRAMES, RAVEN. Ці програмні засоби потребують подальшого детального вивчення та оцінки їх застосовності для моделювання ядерно-відновлювальних енергетичних систем. Для вирішення задачі моделювання енергетичних систем з великими частками відновлювальних джерел програмні засоби мають містити модуль диспетчеризації. Також необхідна розробка методів та комп'ютерних моделей для моделювання цих енергетичних систем.

Наведений у цій статті огляд міжнародного досвіду та наукових публікацій буде використано під час продовження наукових досліджень за тематикою гібридних ядерно-відновлювальних енергетичних систем.

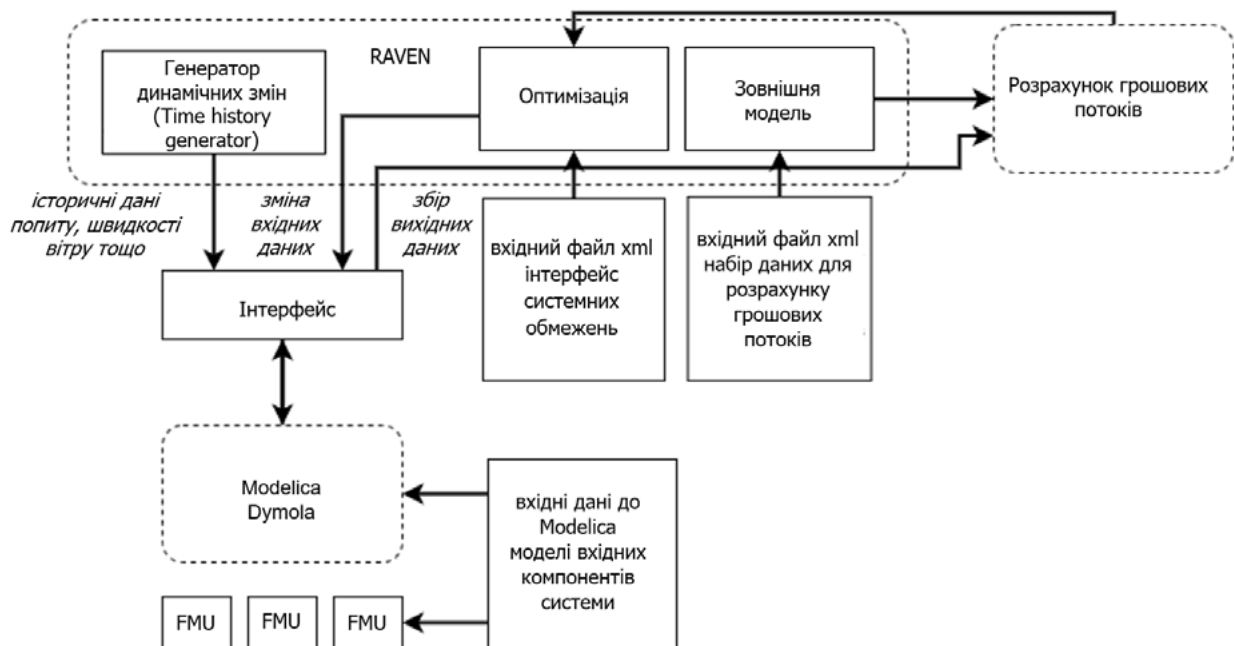


Рисунок 5 – Моделювання та оптимізації гібридної енергетичної системи в RAVEN

### Список використаної літератури

1. Paris Agreement. United Nations Treaty Collection. 12 December 2015. URL: [https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg\\_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=\\_en](https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en).
2. EU taxonomy: Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation. 02 February 2022. URL: [https://ec.europa.eu/info/publications/220202-sustainable-finance-taxonomy-complementary-climate-delegated-act\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/220202-sustainable-finance-taxonomy-complementary-climate-delegated-act_en).
3. Ritchie H., Roser M., Rosado P. Energy. Published online at OurWorldInData.org. URL: <https://ourworldindata.org/energy>.
4. Arefin Md Arman, Islam Mohammad Towhidul, Rashid Fazlur, Mostakim Khodadad, Masuk Nahid Imtiaz, Islam Md. Hasan Ibna. Comprehensive Review of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Status, Operation, Configuration, Benefit, and Feasibility. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2021. Vol. 3. doi: 10.3389/frsc.2021.723910.
5. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році. Укренерго, 2021.
6. Quadrennial Technology Review 2015. Chapter 4: Advancing Clean Electric Power Technologies. Technology Assessments. Chapter 4K. Hybrid Nuclear-Renewable Energy Systems. U.S. Department of Energy, 2015.
7. Ruth M., Spitsen P., Boardman R., Bragg-Sitton, S. Opportunities and Challenges for Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. *Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration Proceedings of a Technical Meeting (IAEA-TECDOC-1885)*. Vienna: IAEA, 2019. pp. 95-111.
8. Ingersoll D., Colbert C., Houghton Z., Snuggerud R., Gaston J. W., Empey M. Integrating nuclear and renewables. *Nuclear Engineering International*. 2016. Vol. 61. pp. 37-39.
9. Locatelli G., Boarin S., Pellegrino F., Ricotti M. E. Load following with Small Modular Reactors (SMR): A real options analysis. *Energy*. 2015. Vol. 80. pp. 41-54. doi: 10.1016/j.energy.2014.11.040.
10. Saukh S., Borysenko A. Mathematical Model of a Local Grid with Small Modular Reactor NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*. 2022. No. 2(94). pp. 44-52. doi: 10.32918/nrs.2022.2(94).05.
11. Ruth M. F., Zinaman O. R., Antkowiak M., Boardman R. D., Cherry R. S., Bazilian M. D. Nuclear-renewable hybrid energy systems: Opportunities, interconnections, and needs. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 78. pp. 684-694. doi: 10.1016/j.enconman.2013.11.030.
12. Flexible Nuclear Energy for Clean Energy System. Technical report, NREL/TP-6A50-77088. National Renewable Energy Laboratory, 2020. doi: 10.2172/1665841.
13. Ruth M., Cutler D., Flores-Espino F., Stark G., Jenkin T., Simpkins T., Macknick J. The Economic Potential of Two Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. Technical Report. United States, 2016. doi: 10.2172/1285734.
14. Ruth. M., Cutler. D., Flores-Espino F., Stark G. The Economic Potential of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems Producing Hydrogen. Technical Report. United States, 2017. doi: 10.2172/1351061.
15. Epiney A., Rabiti C., Alfonsi A., Talbot P., Ganda F. Report on the economic optimization of a demonstration case for a static N-R HES configuration using RAVEN. Technical report. INL/EXT-17-41915. Idaho National laboratory, 2017.
16. Baker T.E., Epiney A.S., Rabiti C., Shittu E. Optimal sizing of flexible nuclear hybrid energy system components considering wind volatility. *Applied Energy*. 2018. Vol. 212. pp. 498-508. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.061.
17. Rabiti C., Alfonsi A., Cogliati J., Mandelli D., Kinoshita R. RAVEN, a new software for dynamic risk analysis. Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 2012. 2014.
18. Epiney A., Kim J. S., Kinoshita R., Rabiti C., Greenwood M. Software Development Infrastructure for the HYBRID Modeling and Simulation Project. Idaho National laboratory, 2016.
19. Advanced Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactors Utility Requirements Document Small Modular Reactors Inclusion Summary. 3002003130. Final Report. EPRI. November 2014. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/SummaryofALWRURDRev13Nov2014.pdf>.
20. Hybrid Energy System (INL) URL: <https://art.inl.gov/hybridenergy/SitePages/Home.aspx>.
21. Dynamic Energy Transport and Integration Laboratory. INL FactSheet, 2021. URL: <https://factsheets.inl.gov/FactSheets/Dynamic%20Energy%20Transport%20Lab2021.pdf>.
22. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration. Proceedings of a Technical Meeting (IAEA-TECDOC-1885). Vienna: IAEA, 2019.
23. Call for Research Proposals for Participation in the New Coordinated Research Project (CRP) Sponsored by the International Atomic Energy Agency (IAEA). Technical Evaluation and Optimization of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. CRP I32012. Vienna: IAEA, 2021.
24. Liu W., Wen F., Xue Y. Power-to-gas technology in energy systems: current status and prospects of potential operation strategies. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2017. No. 5, pp. 439-450. doi: 10.1007/s40565-017-0285-0.
25. Dyck E. IAEA Updates Tool for Economic Assessment of Electricity Generation Technologies. IAEA. 2020, May 4. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-updates-tool-for-economic-assessment-of-electricity-generation-technologies>.
26. Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2. Vienna: IAEA, 2016.
27. Liou J. Nuclear and Renewables: Modelling Tool to Evaluate Hybrid Energy Systems. IAEA. 2021, September 24. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-and-renewables-modelling-tool-to-evaluate-hybrid-energy-systems>.



## References

1. Paris Agreement. United Nations Treaty Collection. 12 December 2015. URL: [https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg\\_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=\\_en](https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en).
2. EU taxonomy: Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation. 02 February 2022. Retrieved from: [https://ec.europa.eu/info/publications/220202-sustainable-finance-taxonomy-complementary-climate-delegated-act\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/220202-sustainable-finance-taxonomy-complementary-climate-delegated-act_en).
3. Ritchie, H., Roser, M., Rosado, P. Energy. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/energy>.
4. Arefin Md Arman, Islam Mohammad Towhidul, Rashid Fazlur, Mostakim Khodadad, Masuk Nahid Imtiaz, Islam Md. Hasan Ibna (2021). Comprehensive Review of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Status, Operation, Configuration, Benefit, and Feasibility. *Frontiers in Sustainable Cities*. 3. doi: 10.3389/frsc.2021.723910.
5. Report on Assessing the Compliance (Adequacy) of Generating Capacities to Cover the Estimated Demand for Electricity and Ensure the Required Reserve in 2020 (2021). Ukrenergо.
6. Quadrennial Technology Review 2015. Chapter 4: Advancing Clean Electric Power Technologies. Technology Assessments. Chapter 4K. Hybrid Nuclear-Renewable Energy Systems. U.S. Department of Energy, 2015.
7. Ruth, M., Spitsen, P., Boardman, R., Bragg-Sitton, S. (2019). Opportunities and Challenges for Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. *Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration Proceedings of a Technical Meeting (IAEA-TECDOC-1885)*. Vienna, IAEA, 95-111.
8. Ingersoll, D., Colbert, C., Houghton, Z., Snuggerud, R., Gaston, J. W., Empey, M. (2016). Integrating nuclear and renewables. *Nuclear Engineering International*. 61, .37-39.
9. Locatelli, G., Boarin, S., Pellegrino, F., Ricotti, M.E. (2015). Load following with Small Modular Reactors (SMR): A real options analysis. *Energy*. 80, 41-54. doi: 10.1016/j.energy.2014.11.040.
10. Saukh, S., Borysenko, A. (2022), Mathematical Model of a Local Grid with Small Modular Reactor NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*. 2(94), 44-52. doi: 10.32918/nrs.2022.2(94).05.
11. Ruth, M. F., Zinaman, O. R., Antkowiak M., Boardman R. D., Cherry R. S., Bazilian M. D. (2014). Nuclear-renewable hybrid energy systems: Opportunities, interconnections, and needs. *Energy Conversion and Management*. 78, 684-694. doi: 10.1016/j.enconman.2013.11.030.
12. Flexible Nuclear Energy for Clean Energy System. Technical Report (2020), NREL/TP-6A50-77088. National Renewable Energy Laboratory. doi: 10.2172/1665841.
13. Ruth, M., Cutler, D., Flores-Espino, F., Stark, G., Jenkin, T., Simpkins, T., Macknick, J. (2016), The Economic Potential of Two Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. Technical Report. United States. doi: 10.2172/1285734.
14. Ruth, M., Cutler, D., Flores-Espino, F., Stark, G. (2017). The Economic Potential of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems Producing Hydrogen. Technical Report. United States. doi: 10.2172/1351061.
15. Epiney, A., Rabiti, C., Alfonsi, A., Talbot, P., Ganda, F. (2017). Report on the economic optimization of a demonstration case for a static N-R HES configuration using RAVEN. Technical Report. INL/EXT-17-41915. Idaho National laboratory.
16. Baker, T. E., Epiney, A. S., Rabiti, C., Shittu, E. (2018). Optimal sizing of flexible nuclear hybrid energy system components considering wind volatility. *Applied Energy*. 212, 498-508, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.061.
17. Rabiti, C., Alfonsi, A., Cogliati, J., Mandelli, D., Kinoshita, R. (2014). RAVEN, a new software for dynamic risk analysis. Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 2012.
18. Epiney, A., Kim, J. S., Kinoshita R., Rabiti C., Greenwood M. (2016). Software Development Infrastructure for the HYBRID Modeling and Simulation Project. Idaho National laboratory.
19. Advanced Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactors Utility Requirements Document Small Modular Reactors Inclusion Summary. 3002003130. Final Report. EPRI. November 2014. Retrieved from: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/SummaryofALWRURDRev13Nov2014.pdf>.
20. Hybrid Energy System (INL) Retrieved from: <https://art.inl.gov/hybridenergy/SitePages/Home.aspx>.
21. Dynamic Energy Transport and Integration Laboratory. INL FactSheet, 2021. Retrieved from: <https://factsheets.inl.gov/FactSheets/Dynamic%20Energy%20Transport%20Lab2021.pdf>.
22. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration (2019), Proceedings of Technical Meeting (IAEA-TECDOC-1885). Vienna, IAEA.
23. Call for Research Proposals for Participation in the New Coordinated Research Project (CRP) Sponsored by the International Atomic Energy Agency (IAEA) (2021). Technical Evaluation and Optimization of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. CRP I32012. Vienna, IAEA.
24. Liu, W., Wen, F., Xue, Y. (2017). Power-to-gas technology in energy systems: current status and prospects of potential operation strategies, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5, 439-450, doi: 10.1007/s40565-017-0285-0.
25. Dyck, E. IAEA Updates Tool for Economic Assessment of Electricity Generation Technologies. IAEA. 2020, May 4. Retrieved from: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-updates-tool-for-economic-assessment-of-electricity-generation-technologies>.
26. Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide (2016), IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2. Vienna: IAEA.
27. Liou, J. (2021). Nuclear and Renewables: Modelling Tool to Evaluate Hybrid Energy Systems. IAEA, September 24. Retrieved from: <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-and-renewables-modelling-tool-to-evaluate-hybrid-energy-systems>.

## **Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Overview of International Experience and Current State**

**M. Darybohov, O. Dybach**

Separated subdivision "Center Innovation in Nuclear Technology for the Safe future" State enterprise "State scientific and technical center for nuclear and radiation safety", Slavutych, Ukraine

Nuclear energy and renewables are two low-emission energy sources that could substantially help to decarbonize the energy sector. The increased penetration of renewable energy sources such as wind and solar requires additional load-following capacities. The existing NPPs have design limitations for load-following mode operation, at the same time this mode is ensured by new NPPs design, including small modular reactors. The opportunity to couple these energy resources need to be explored to take advantage of benefits offered by each technology to supply reliable and sustainable electricity to the grid. Nuclear-renewable hybrid energy systems are defined as facilities comprised of nuclear reactors, renewable energy sources and industrial processes. A nuclear-renewable hybrid energy system can leverage the benefits of each technology by

performing a balancing act through load-following operation or by adjusting output in terms of covering the industrial process demand; nuclear power can enhance the efficiency of renewables, mitigate electricity market volatility and deliver necessary ancillary grid services. The optimization of nuclear-renewable hybrid energy systems is a relevant task, considering specifics of these types of generation in order to achieve optimal technical and economic indicators.

The paper provides an overview of current international research and current status of implementing nuclear-renewable energy systems. The definition of the term "hybrid energy system" is proposed and opportunities of nuclear-renewable hybrid energy systems that provide a number of potential economic and societal benefits are provided. An overview of computer tools for solving the problems of modeling and optimization of nuclear-renewable hybrid energy systems is presented.

Keywords: calculation tool, hybrid energy system, nuclear energy, optimization, renewable energy.

Отримано 04.07.2022