

ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСНОГО ТА ВИРОБНИЧОГО ПОТЕНЦІАЛУ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

©2026 ГРІНЧЕНКО Г. С.

УДК 338.45:621.039
JEL: L94; O13; Q40; Q48

Грінченко Г. С. Оцінювання ресурсного та виробничого потенціалу атомної енергетики протягом життєвого циклу

У статті досліджено підходи до оцінювання ресурсного та виробничого потенціалу атомної енергетики з урахуванням специфіки етапів життєвого циклу ядерно-енергетичних об'єктів, починаючи від проєктування та будівництва та завершуючи експлуатацією, продовженням ресурсу та виведенням з експлуатації. Наявні підходи до оцінювання потенціалу атомної енергетики переважно зосереджуються або на техніко-економічних параметрах функціонування енергоблоків, або на питаннях безпеки, тоді як взаємозв'язок ресурсних обмежень, виробничих характеристик і життєвого циклу об'єктів атомної генерації залишається недостатньо формалізованим. Саме ця прогалина визначила спрямованість проведеного дослідження. Метою статті є формування комплексного підходу до оцінювання ресурсного та виробничого потенціалу атомної енергетики протягом життєвого циклу з урахуванням технологічних, організаційних, економічних та інфраструктурних параметрів. У роботі використано системний підхід, методи структурно-функціонального аналізу, порівняльного оцінювання, елементів життєвого циклу (Life Cycle Approach), а також узагальнення міжнародних підходів МАГАТЕ щодо управління ресурсами атомної енергетики. Інформаційною базою стали аналітичні матеріали International Atomic Energy Agency, World Nuclear Association, наукові публікації з питань енергетичної економіки та управління інфраструктурними системами. У результаті дослідження встановлено, що структура ресурсного потенціалу атомної енергетики змінюється залежно від стадії життєвого циклу, а найбільш ресурсомісткими етапами є проєктування, спорудження та модернізація енергоблоків. Доведено, що виробничий потенціал атомної енергетики не може оцінюватися виключно через встановлену потужність або коефіцієнт використання потужності, оскільки визначальний вплив мають паливний цикл, технічний стан обладнання, кадровий ресурс, рівень цифровізації систем управління та параметри довгострокової експлуатації. Запропоновано інтегральну структуру оцінювання потенціалу, що поєднує ресурсні, виробничі та інфраструктурні компоненти. Наукова новизна роботи полягає в розширенні підходу до оцінювання потенціалу атомної енергетики через інтеграцію життєвого циклу ядерних об'єктів у систему економічного аналізу та управління. Практична цінність результатів полягає в можливості використання запропонованого підходу для формування стратегій модернізації атомної генерації, планування довгострокової експлуатації енергоблоків, оцінювання потреб у ресурсах і підтримки управлінських рішень у сфері енергетичної безпеки.

Ключові слова: атомна енергетика; життєвий цикл; ресурсний потенціал; виробничий потенціал; ядерний паливний цикл; енергетична безпека; управління ресурсами.

Рис.: 1. Табл.: 1. Формул.: 3. Бібл.: 21.

Грінченко Ганна Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна)

E-mail: h.s.hrinenko@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>

UDC 338.45:621.039
JEL: L94; O13; Q40; Q48

Hrinchenko H. S. Evaluation of the Resource and Production Potential of Nuclear Energy Throughout the Life Cycle

The article examines approaches to assessing the resource and production potential of nuclear energy taking into account the specifics of the life cycle stages of nuclear power facilities, including design, construction, operation, life extension and decommissioning. Existing approaches to assessing the potential of nuclear energy are mainly focused either on technical and economic parameters of power unit operation or on safety issues, while the relationship between resource constraints, production characteristics and the life cycle of nuclear generation facilities remains insufficiently formalized. This research addresses the identified gap. The aim of the article is to develop a comprehensive approach to assessing the resource and production potential of nuclear energy throughout the life cycle considering technological, organizational, economic and infrastructural parameters. The study applies a system approach, methods of structural and functional analysis, comparative assessment, life cycle approach and generalization of international IAEA approaches to nuclear resource management. The information base includes analytical materials of the International Atomic Energy Agency, the World Nuclear Association, and scientific publications on energy economics and infrastructure management. The study demonstrates that the structure of the resource potential of nuclear energy changes depending on the stage of the life cycle, while the most resource-intensive stages are design, construction and modernization of power units. It has been proved that the production potential of nuclear energy cannot be assessed solely through installed capacity or capacity factor, since the decisive influence is exerted by the fuel cycle, technical condition of equipment, human resources, digitalization level of control systems and parameters of long-term operation. An integrated structure for assessing nuclear energy potential combining resource, production and infrastructural components has been proposed. The scientific novelty of the research lies in expanding approaches to the assessment of nuclear energy potential through the integration of the life cycle of nuclear facilities into the system of economic analysis and management. The practical significance of the obtained results consists in the possibility of using the proposed approach for developing strategies for modernization of nuclear generation, planning long-term operation of power units, assessing resource needs and supporting managerial decisions in the field of energy security.

Keywords: nuclear energy; life cycle; resource potential; production potential; nuclear fuel cycle; energy security; resource management.

Fig.: 1. Tabl.: 1. Formulae: 3. Bibl.: 21.

Hrinchenko Hanna S. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University (4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine)

E-mail: h.s.hrinenko@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>

Атомна енергетика належить до найбільш капіталомістких і технологічно складних сегментів енергетичного сектора, у межах якого економічна ефективність функціонування визначається не лише виробничими характеристиками енергоблоків, а й здатністю системи забезпечувати довгострокову ресурсну стійкість упродовж усього життєвого циклу ядерно-енергетичних об'єктів. Для атомної генерації характерна значна тривалість інвестиційного циклу, висока залежність від стану інфраструктури, регуляторних процедур, кадрового забезпечення та функціонування ядерного паливного циклу, унаслідок чого оцінювання ресурсного та виробничого потенціалу потребує багатокомпонентного підходу.

Проблематика адекватного оцінювання сукупного потенціалу атомної енергетики фундаментально ускладнюється вираженою темпоральною асиметрією, за якої кожна окрема стадія багатодесятилітнього життєвого циклу ядерного об'єкта генерує принципово відмінну структуру витрат, специфічних ресурсних потреб і жорстких виробничих обмежень, що виключає можливість застосування лінійних екстраполяційних моделей.

Зокрема, на початковому етапі проектування та безпосереднього спорудження енергоблоків домінують колосальні потреби у фінансовому капіталі та унікальних матеріальних ресурсах, створюючи ефект так званих «безповоротних витрат» (*sunk costs*), коли економічна життєздатність проекту стає максимально вразливою до макроекономічних шоків, волатильності дисконтних ставок і неминучих регуляторних затримок, здатних мультиплікувати початкові кошториси ще задовго до моменту комерційної генерації першого кіловата.

Натомість під час переходу до стадії тривалої експлуатації фокус ресурсної напруги зміщується з інтенсивного капіталоутворення на забезпечення жорсткої технічної надійності реакторних установок, підтримку стабільно високого коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП), формування стійких ланцюгів постачання ядерного палива та збереження вузькоспеціалізованої кадрової компетентності, поступова деградація якої здатна стрімко нівелювати будь-які попередні технологічні чи фінансові переваги генератуючої компанії.

Водночас фінальна стадія виведення з експлуатації, яка невіддільна від процесів довгострокового поводження з відпрацьованим ядерним паливом та ізоляцією радіоактивних відходів, формує масштабний відкладений структурний шок, де визначальними стають складнопрогнозовані екологічні ризики, тривалі інфраструктурні демонтажні роботи та колосальні фінансові зобов'язання, акумулювання яких має безперервно відбуватися

впродовж усього періоду роботи реактора через механізми цільових фондів, глибоко чутливі до інфляційних процесів та довгострокової інвестиційної кон'юнктури.

Враховуючи цю глибоку структурну гетерогенність, традиційне оцінювання галузевого потенціалу, яке зводиться до банальної фіксації номінальної встановленої потужності або поточних обсягів відпуску електроенергії в мережу, виявляється методологічно неспроможним, оскільки такий редуцціоністський підхід повністю ігнорує прихований тягар відкладених зобов'язань, реальну вартість капіталу в часі та неминучу трансформацію ресурсних дефіцитів, пропонуючи аналітикам статичну ілюзію стабільності замість динамічної картини фактичної економічної життєздатності енергосистеми.

Дослідження ресурсного та виробничого потенціалу атомної енергетики набуває додаткового значення в умовах енергетичної трансформації, необхідності декарбонізації економіки, модернізації енергетичної інфраструктури та зростання вимог до енергетичної безпеки. Окремого значення набуває питання довгострокової експлуатації енергоблоків, оскільки подовження терміну їх експлуатації змінює структуру ресурсного забезпечення та впливає на виробничі параметри енергетичної системи.

Метою статті є формування комплексного підходу до оцінювання ресурсного та виробничого потенціалу атомної енергетики впродовж життєвого циклу з урахуванням технологічних, організаційних, економічних та інфраструктурних чинників.

Огляд останніх досліджень та публікацій. Питання функціонування атомної енергетики в контексті довгострокового ресурсного забезпечення та ефективності виробничих систем розглядаються у працях міжнародних організацій, галузевих аналітичних центрів та науковців, які досліджують проблематику енергетичної економіки, управління інфраструктурою та життєвого циклу складних технічних систем.

У документах International Atomic Energy Agency значна увага приділяється ресурсному забезпеченню ядерної енергетики, оцінюванню інфраструктурних потреб і проблемам довгострокової експлуатації ядерних установок [1–3]. У роботах МАГАТЕ ресурсний потенціал розглядається як поєднання природних, технологічних, кадрових та організаційних ресурсів, необхідних для забезпечення сталого функціонування атомної енергетики. При цьому більшість методичних підходів зосереджена на окремих стадіях життєвого циклу без формування цілісної системи економічного оцінювання [4; 5].

У публікаціях World Nuclear Association основна увага приділяється структурі ядерного паливного циклу, ресурсній забезпеченості атомної генерації та матеріальній інтенсивності різних типів енергетичних технологій [6; 7]. Дослідники відзначають, що атомна енергетика характеризується високою енергетичною щільністю та нижчими матеріальними витратами порівняно з низкою інших типів генерації, однак такі оцінки здебільшого базуються на агрегованих технічних показниках.

Окремий, порівняно новий напрям секторальних досліджень безпосередньо пов'язаний зі спробами імплементації методології оцінювання життєвого циклу для глибокого аналізу системної ефективності та довгострокової стійкості енергетичних об'єктів, де відхід від зрізових статичних балансів дозволяє виявити приховані ресурсоемі вузли. У спеціалізованих працях, сфокусованих на проблематиці довгострокової сталості підприємств ядерного циклу, ресурсний потенціал атомної енергетики переважно трактується не просто як геологічна наявність сировини, а концептуалізується через фізичну та комерційну доступність розвіданих уранових запасів, наявні технологічні потужності з конверсії та збагачення, можливості часткового або повного замикання ядерного паливного циклу, перспективи каскадного повторного використання конструкційних матеріалів та критичні параметри безпечного поводження з високоактивним відпрацьованим паливом [8–11].

Водночас, незважаючи на досить ґрунтовне опрацювання сировинного та екологічного базису, питання еволюції суто виробничого потенціалу атомних станцій, який неминуче трансформується під тиском зносу обладнання та зміни ринкової кон'юнктури в координатах повного життєвого циклу від проектування до «зеленої галявини», залишаються методологічно маргіналізованими та найменш формалізованими в сучасній економічній літературі.

Аналізуючи сформований масив наукових досліджень з економіки енергетики, можна констатувати стійку тенденцію до редукції виробничого потенціалу атомної генерації виключно до набору операційних метрик, де головними індикаторами ефективності зазвичай виступають показники коефіцієнта використання встановленої потужності, проектної та фактичної тривалості паливних кампаній, поточного рівня експлуатаційної надійності реакторного обладнання та зведеної вартості виробництва одиниці електроенергії [12–15]. Такий суто технократичний і вузькоопераційний підхід виявляється концептуально обмеженим, оскільки він за визначенням виносить

за дужки критично важливі системні вразливості, не враховуючи повною мірою жорсткі інфраструктурні обмеження енергомереж щодо видачі та балансування базової потужності, високу геополітичну та логістичну залежність від висококонцентрованих ринків постачання свіжого ядерного палива, стрімке накопичення кадрових ризиків унаслідок розриву поколінь вузькопрофільного оперативного персоналу та неминуче фізичне і моральне старіння унікального устаткування, що сукупно формують реальний, а не номінальний ліміт виробничих спроможностей об'єкта [16–18].

Як наслідок, критичний аналіз наявної фахової літератури переконливо свідчить про глибоку методологічну фрагментарність і концептуальний дуалізм у підходах до оцінювання сукупного потенціалу атомної енергетики, що унеможливає формування адекватного розуміння довгострокової стійкості генерації. Більшість відомих дослідницьких парадигм тяжіють до аналітичних крайнощів: вони або надмірно концентруються на вузьких питаннях ресурсного забезпечення без прив'язки до здатності системи безперебійно конвертувати ці ресурси в енергію, або ж ізольовано аналізують поточні виробничі характеристики конкретних енергоблоків, повністю ігноруючи неминучу зміну структурних параметрів, обмежень і цільових функцій системи на різних хронологічних етапах її експлуатації та виведення з неї. Окреслена теоретико-методологічна прогалина об'єктивно зумовлює гостру наукову необхідність розробки та валідації комплексного концептуального підходу, архітектура якого базуватиметься на презумпції нерозривності матеріальних, фінансових і технологічних потоків, дозволяючи розглядати ресурсний і виробничий потенціали не як автономні змінні, а як глибоко взаємопов'язані, взаємозалежні та динамічні компоненти єдиної енергетичної системи, що безперервно еволюціонують впродовж усього життєвого циклу.

Мета та гіпотези дослідження. Метою дослідження є розроблення комплексного підходу до оцінювання ресурсного та виробничого потенціалу атомної енергетики впродовж життєвого циклу ядерно-енергетичних об'єктів.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що ресурсний і виробничий потенціал атомної енергетики мають оцінюватися як динамічна система взаємопов'язаних характеристик, структура яких змінюється залежно від стадії життєвого циклу ядерно-енергетичних об'єктів.

Методологічну основу дослідження становить системний підхід, який дозволяє розглядати атомну енергетику як багаторівневу виробничо-ресурсну систему, функціонування якої визна-

чається взаємодією технологічних, економічних, інфраструктурних та організаційних компонентів.

У процесі дослідження використано метод структурно-функціонального аналізу для визначення елементів ресурсного та виробничого потенціалу; метод порівняльного аналізу для зіставлення характеристик різних стадій життєвого циклу; підхід життєвого циклу (*Life Cycle Approach*) для дослідження трансформації ресурсних потреб і виробничих параметрів; метод логічного узагальнення, для формування інтегральної структури оцінювання потенціалу атомної енергетики.

Інформаційною базою дослідження стали аналітичні матеріали International Atomic Energy Agency, World Nuclear Association, наукові публікації з економіки енергетики, дослідження у сфері управління інфраструктурними системами та ресурсного забезпечення атомної енергетики.

Під час дослідження ресурсний потенціал атомної енергетики визначався як сукупність матеріальних, паливних, кадрових, фінансових, технологічних та інфраструктурних ресурсів, необхідних для забезпечення функціонування ядерно-енергетичної системи. Виробничий потенціал трактувався як здатність системи забезпечувати стабільне виробництво електроенергії в заданих техніко-економічних і безпекових параметрах.

ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ЯК ОСНОВА ОЦІНЮВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ

Системна архітектура життєвого циклу об'єктів атомної енергетики формує складний, багатоетапний і хронологічно розтягнутий континуум взаємопов'язаних стадій, кожна з яких генерує принципово відмінну структуру потреб у ресурсному забезпеченні та детермінує специфічні межі реалізації виробничого потенціалу всієї генераційної системи. Цей тривалий еволюційний ланцюг, що охоплює критичні фази концептуального проектування, фізичного спорудження, поетапного введення в експлуатацію, тривалого комерційного генерування, можливого продовження проектного ресурсу із супутньою глибокою модернізацією, а також фінального незворотного виведення з експлуатації, вимагає застосування динамічних моделей аналізу, здатних враховувати міжстадійну міграцію ризиків та неминучу трансформацію матеріально-фінансових дефіцитів.

Безпосередньо на ініціальному етапі проектування, де визначальний формуючий вплив на кінцевий потенціал системи здійснюють акумульовані науково-технічні ресурси, потужність інженерної бази, глибина проектних компетенцій профільних інститутів та безперешкодний доступ

до передових реакторних технологій, відбувається жорстка фіксація так званої «технологічної колії» (*path dependence*), яка безальтернативно зумовлює архітектуру майбутніх експлуатаційних параметрів енергоблока. Саме в цій фазі закладаються фундаментальні техніко-економічні характеристики об'єкта, включно з розрахунковим рівнем паливної ефективності активної зони, залишковими резервами безпеки тепломеханічного обладнання, потенціалом для майбутніх теплових форсувань (*uprating*) та загальною проектною тривалістю комерційної експлуатації, що сукупно утворюють жорстку верхню межу теоретично досяжного виробничого потенціалу генеруючої одиниці.

З переходом до етапу безпосереднього фізичного спорудження домінуючий статус у структурі обмежень стрімко перехоплюють обсяги доступного фінансового капіталу, стабільність постачання унікальних матеріалів та пропускна здатність будівельно-монтажної інфраструктури, що зумовлено екстремально високою початковою капіталомісткістю (*overnight cost*) ядерних об'єктів. Враховуючи безпрецедентну чутливість економіки атомної генерації до вартості грошей у часі, будь-які логістичні, регуляторні чи технологічні затримки на будівельному майданчику провокують нелінійне геометричне зростання сукупних інвестиційних витрат через акумулювання відсотків за залученими кредитами (*interest during construction*), що автоматично деформує початкову фінансову модель і суттєво звужує прогнозований коридор економічно рентабельного виробничого потенціалу ще задовго до моменту фізичного пуску реакторної установки.

Натомість під час тривалої стадії комерційної експлуатації вектор управлінської уваги повністю зміщується з інтенсивного капіталоутворення на забезпечення безперервної підтримки високої технічної надійності всього комплексу обладнання, формування стійких і диверсифікованих ланцюгів постачання свіжого ядерного палива, наскрізну цифровізацію систем предиктивного технічного обслуговування, а також на край складне утримання критичної маси вузькоспеціалізованої кадрової компетентності в умовах природної зміни поколінь оперативного персоналу. У цьому контексті фактичний виробничий потенціал атомної енергетики виявляється абсолютно залежним від здатності експлуатуючої організації послідовно максимізувати інтегральний показник коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП), оскільки виключно стабільна генерація максимальних обсягів базової електроенергії впродовж усього міжремонтного періоду дозволяє забезпечити адекватну

амортизацію колосальних капітальних інвестицій, понесених на етапі спорудження, та згенерувати ліквідний фінансовий ресурс, критично необхідний для капіталізації цільових фондів майбутнього виведення об'єкта з експлуатації (рис. 1).

ваним паливом можуть безпосередньо впливати на здатність енергосистеми підтримувати стабільну генерацію. Крім того, для атомної енергетики характерна висока залежність від регламентних ремонтів, системи контролю безпеки та технічної



Рис. 1. Схематична модель: еволюція ресурсних і виробничих домінант у розрізі етапів життєвого циклу енергетичного підприємства (АЕС)

Джерело: розроблено автором і візуалізовано за допомогою Notebook LM.

Виробничий потенціал атомної енергетики може бути представлений у вигляді функціональної залежності:

$$P_v = f(K_v, R_f, T_n, C_p, D_i),$$

де P_v – виробничий потенціал атомної енергетики; K_v – коефіцієнт використання встановленої потужності; R_f – рівень паливного забезпечення; T_n – технічна надійність обладнання; C_p – кадровий потенціал; D_i – рівень цифровізації та інфраструктурної підтримки.

Запропонована залежність демонструє, що виробничий потенціал формується не лише технічними параметрами енергоблоків, а й системою забезпечення експлуатації, кадровою стійкістю, рівнем цифрової інтеграції та надійністю паливного циклу. У випадку атомної генерації навіть короткострокові порушення окремих компонентів ресурсного забезпечення можуть спричинити непропорційно високі втрати генераційної спроможності, оскільки технологічна структура ядерної енергетики характеризується значною взаємозалежністю елементів.

На відміну від традиційних енергетичних систем, в атомній енергетиці виробничий потенціал значною мірою залежить від параметрів ядерного паливного циклу. Порушення логістики постачання палива, обмеження потужностей зі збагачення урану або проблеми з поводженням із відпрацьо-

діагностики обладнання, що формує додаткові вимоги до ресурсного забезпечення впродовж тривалого життєвого циклу.

Для української атомної енергетики питання оцінювання виробничого потенціалу має окреме значення у зв'язку з високою часткою атомної генерації в структурі виробництва електроенергії, необхідністю продовження ресурсу енергоблоків та потребою модернізації виробничої інфраструктури. До початку повномасштабної війни атомна генерація забезпечувала понад половину виробництва електроенергії в Україні, залишаючись базовим елементом енергосистеми (табл. 1).

Наведені показники свідчать, що виробничий потенціал української атомної енергетики значною мірою залежить від результатів програм довгострокової експлуатації, модернізації систем безпеки та стабільності паливного забезпечення. Значна частина енергоблоків була введена в експлуатацію ще у 1980-х роках, унаслідок чого підтримання їх виробничої ефективності потребує постійного оновлення обладнання, розвитку систем діагностики та модернізації цифрової інфраструктури.

Окремий вплив на ресурсно-виробничий потенціал української атомної енергетики мають воєнні ризики, фізична безпека енергетичних об'єктів та обмеження інфраструктурної стійкості енерго-

Таблиця 1

Показники виробничого потенціалу атомної енергетики України

Показник	Значення
Кількість енергоблоків (до 2022 р.)	15
Встановлена потужність АЕС	Близько 13,8 ГВт
Частка атомної генерації у виробництві електроенергії	50–55%
Основний оператор	НАЕК «Енергоатом»
Тип реакторів	ВВЕР-440, ВВЕР-1000
Середній термін експлуатації більшості енергоблоків	Понад 30 років
Частка енергоблоків, що пройшли процедуру продовження ресурсу	Понад 70%
Основний напрям модернізації	Підвищення безпеки та цифровізація

Джерело: складено автором на основі даних IAEA, Energoatom, World Nuclear Association [1–5].

системи. У таких умовах оцінювання потенціалу атомної генерації потребує врахування не лише економічних і виробничих параметрів, а й чинників енергетичної безпеки, фізичного захисту критичної інфраструктури та резервування логістичних ланцюгів.

СТРУКТУРА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Ресурсний потенціал атомної енергетики за своєю онтологічною природою становить глибоко інтегровану, багатокomпонентну макросистему, архітектура якої формується не шляхом механічного об'єднання ізольованих факторів виробництва, а через їхню безперервну синергетичну взаємодію, що сукупно генерує здатність енергетичного об'єкта виконувати своє цільове призначення в умовах жорстких регуляторних обмежень та волатильності зовнішнього середовища.

Деталізована морфологічна структура зазначеного ресурсного базису вимагає обов'язкового виокремлення таких критичних функціональних доменів:

- ✦ **Природно-сировинні ресурси**, які охоплюють не лише геологічно підтверджені, комерційно видобувні запаси уранових руд, але й фундаментальні фізико-географічні параметри майданчиків розміщення атомних електростанцій, включно із сеймотектонічною стабільністю територій та критично важливої для підтримання термодинамічних циклів наявності гарантованих, кліматично стійких джерел охолоджувальної води.
- ✦ **Паливні ресурси**, що репрезентують високотехнологічний логістично-виробничий ланцюг стабільного постачання свіжих тепловиділяючих збірок, рівень комерційної та геополітичної диверсифікації постачаль-

ників ядерного палива, а також наявність інфраструктурних потужностей для безпечного, довгострокового проміжного зберігання відпрацьованих паливних касет.

- ✦ **Виробничо-технологічні ресурси**, представлені сукупністю фізичних активів генеруючих підприємств, куди входять ядерні реакторні установки, турбогенераторні комплекси, системи резервного електроживлення, спеціалізоване ремонтне обладнання та технології поводження з радіоактивними відходами різного рівня активності.
- ✦ **Кадрові ресурси**, які в специфічних умовах ядерної галузі визначаються не кількісним складом персоналу, а глибиною накопичених операційних знань, інституційною пам'яттю експлуатуючої організації, ефективністю роботи навчально-тренувальних центрів із повномасштабними тренажерами та рівнем укорінення фундаментальної культури безпеки серед осіб, які приймають критичні управлінські рішення.
- ✦ **Фінансово-інвестиційні ресурси**, що формують здатність генеруючої компанії акумулювати масштабний довгостроковий капітал за прийнятною вартістю для реалізації капіталомістких проектів нового будівництва, стабільно фінансувати поточні ремонтні кампанії та безперервно наповнювати цільові резервні фонди, призначені для майбутнього виведення ядерних установок з експлуатації.
- ✦ **Інфраструктурні ресурси**, які визначають здатність зовнішньої об'єднаної енергосистеми абсорбувати згенеровану базову потужність, що вимагає наявності високовольтних ліній електропередач із достатньою пропускну здатністю, доступності високоманеврових балансуючих потуж-

ностей для компенсації добових графіків навантаження та відповідної транспортної логістики для переміщення великогабаритного обладнання.

- ✦ **Інформаційно-аналітичні ресурси**, що в епоху цифрової трансформації енергетики включають системи предиктивного моніторингу стану обладнання, цифрові двійники енергоблоків, бази даних експлуатаційного досвіду та автоматизовані комплекси підтримки прийняття рішень під час перехідних або аварійних режимів роботи.

Зазначена багаторівнева конфігурація ресурсного потенціалу не є статичною величиною, оскільки вона зазнає радикальних, незворотних структурних трансформацій, безпосередньо зумовлених переходом ядерного об'єкта між стадіями його експлуатаційного життєвого циклу, де кожен новий хронологічний етап імперативно диктує кардинальну зміну ресурсних пріоритетів та факторів вразливості.

Зокрема, ініціальний етап масштабного фізичного будівництва енергоблоків характеризується абсолютною домінуючою роллю доступних фінансово-інвестиційних ресурсів та вартістю залученого довгострокового капіталу, дефіцит або суттєве подорожчання якого здатні повністю паралізувати проект через ефект лавиноподібного накопичення відсотків за кредитами в період нульової генерації. Натомість у процесі багаторічної комерційної експлуатації центр ваги об'єктивно зміщується в бік забезпечення бездоганної кадрової компетентності вузькопрофільного оперативного персоналу та підтримки високого рівня експлуатаційної готовності технологічних систем шляхом безперебійного постачання паливних і ремонтних матеріалів.

Водночас на критичній стадії обґрунтування та практичної реалізації процедур продовження терміну експлуатації поза межі початкових проектних значень абсолютним детермінантом подальшої економічної та фізичної життєздатності системи стають результати поглибленої неруйнівної технічної діагностики обладнання першого контуру, поточні параметри незворотного радіаційного окрихнення металу корпусу реактора, а також наявність консолідованих фінансово-технологічних можливостей для комплексної глибокої модернізації систем управління та безпеки відповідно до оновлених, значно жорсткіших регуляторних стандартів, що формуються з урахуванням глобального досвіду подолання важких ядерних аварій.

Інтегральний ресурсний потенціал може бути представлений у вигляді:

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j r_j,$$

де R_i – інтегральний ресурсний потенціал; w_j – ваговий коефіцієнт складової; r_j – оцінка окремого виду ресурсів.

Такий підхід дозволяє враховувати нерівномірність впливу окремих ресурсів на функціонування атомної генерації. Наприклад, дефіцит висококваліфікованого персоналу в умовах довгострокової експлуатації може створювати більші ризики для виробничого потенціалу, ніж обмеження окремих матеріальних ресурсів.

Результати дослідження свідчать, що ресурсний і виробничий потенціал атомної енергетики формують єдину взаємозалежну систему. Зменшення ресурсного потенціалу, пов'язане зі старінням обладнання, зношенням інфраструктури або кадровими обмеженнями, призводить до поступового зниження виробничої ефективності. У процесі довгострокової експлуатації змінюється співвідношення між виробничими та ресурсними характеристиками. Якщо на початкових етапах життєвого циклу домінує виробничий потенціал, то після 40–50 років експлуатації суттєво зростає роль ресурсних обмежень, що проявляється в необхідності проведення масштабної модернізації, збільшенні витрат на підтримання безпеки та зростанні потреби у спеціалізованому обладнанні.

Аналіз міжнародної практики засвідчує [19–21], що подовження терміну експлуатації енергоблоків є економічно доцільним лише за умови збереження достатнього рівня ресурсного потенціалу системи. В іншому випадку зростання витрат на підтримання технічного стану обладнання може призводити до зниження економічної ефективності атомної генерації.

З урахуванням результатів дослідження запропоновано інтегральну модель оцінювання потенціалу атомної енергетики, що поєднує три ключові компоненти:

$$I_n = \alpha R_i + \beta P_v + \gamma S_i,$$

де I_n – інтегральний потенціал атомної енергетики; R_i – ресурсний потенціал; P_v – виробничий потенціал; S_i – інфраструктурно-безпековий потенціал; α , β , γ – вагові коефіцієнти.

Інфраструктурно-безпековий компонент включає параметри фізичного захисту, системи аварійного реагування, цифрову стійкість, стан мережевої інфраструктури та відповідність міжнародним вимогам безпеки.

Інтеграція запропонованої концептуальної моделі в аналітичний інструментарій галузевого планування дозволяє трансформувати процес оцінювання потенціалу атомної енергетики зі статичної фіксації поточних показників у динамічне

дослідження, де кожна стадія життєвого циклу розглядається крізь призму її унікальних обмежень та можливостей. Завдяки такому підходу з'являється методологічна база для детального відстеження того, як саме дефіцит конкретних ресурсів – від кадрового дефіциту до логістичних розривів у постачанні ядерного палива – трансформується у зниження виробничих параметрів системи, що особливо критично для запобігання деградації генеруючих потужностей у довгостроковій перспективі.

Понад те, модель стає фундаментом для конструювання багатоваріантних сценаріїв модернізації наявних енергоблоків, оскільки вона дозволяє точно зважити очікуваний приріст ефективності проти обсягу необхідних інвестицій та технологічних ризиків, характерних для пізніх етапів експлуатації. Це створює об'єктивні передумови для прийняття стратегічних рішень щодо доцільності продовження терміну експлуатації в понадпроектний період, коли економічна вигода від додаткової генерації має бути ретельно збалансована з витратами на забезпечення ядерної безпеки та накопиченням коштів на майбутній демонтаж. У кінцевому підсумку практичне застосування цієї моделі забезпечує якісну аналітичну підтримку всього процесу стратегічного планування розвитку галузі, дозволяючи синхронізувати розвиток виробничої бази з реальними ресурсними можливостями держави та глобальними технологічними трендами, уникаючи при цьому фрагментарності в управлінських рішеннях.

Проведене дослідження має низку обмежень. *По-перше*, запропонований підхід базується переважно на концептуальному рівні інтеграції показників та потребує подальшої кількісної апробації на прикладі конкретних атомних енергосистем. *По-друге*, окремі параметри ресурсного потенціалу, зокрема кадрові та інфраструктурні характеристики, складно формалізувати у вигляді універсальних індикаторів. *По-третє*, структура потенціалу може суттєво відрізнятися залежно від типу реакторних технологій та особливостей національної енергетичної політики.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження встановлено, що оцінювання ресурсного та виробничого потенціалів атомної енергетики потребує використання комплексного підходу, у межах якого життєвий цикл ядерно-енергетичних об'єктів розглядається як ключовий фактор трансформації ресурсних і виробничих характеристик системи.

Доведено, що виробничий потенціал атомної енергетики не може визначатися виключно через

показники встановленої потужності або обсягів генерації електроенергії, оскільки визначальний вплив мають параметри паливного забезпечення, технічної надійності обладнання, кадрового ресурсу, модернізаційного потенціалу та інфраструктурної стійкості.

Запропоновано інтегральну модель оцінювання потенціалу атомної енергетики, що поєднує ресурсний, виробничий та інфраструктурно-безпечовий компоненти. Наукова новизна дослідження полягає в розширенні підходів до економічного аналізу атомної енергетики через інтеграцію параметрів життєвого циклу в систему оцінювання потенціалу.

Практичне значення результатів полягає в можливості використання запропонованого підходу під час розроблення стратегій модернізації атомної генерації, оцінювання довгострокової експлуатації енергоблоків, планування ресурсного забезпечення та формування рішень у сфері енергетичної безпеки.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з кількісною апробацією інтегральної моделі, розробленням системи показників для різних типів реакторних технологій та формуванням методів прогнозування зміни потенціалу атомної енергетики в умовах енергетичної трансформації. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Resource Requirements for Nuclear Power Infrastructure Development. *International Atomic Energy Agency*. Vienna : IAEA, 2022. URL: <https://www.iaea.org/publications/14882/resource-requirements-for-nuclear-power-infrastructure-development>
2. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact from Depletion of Resources. *International Atomic Energy Agency*. Vienna : IAEA, 2015. URL: <https://www.iaea.org/publications/10748/inpro-methodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-environmental-impact-from-depletion-of-resources>
3. Long Term Operation of Nuclear Fuel Cycle Facilities. *International Atomic Energy Agency*. Vienna : IAEA, 2024. DOI: <https://doi.org/10.61092/iaea.iygp-xse5>
4. Nuclear Fuel Cycle Overview. *World Nuclear Association*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview>
5. Mineral Requirements for Electricity Generation. *World Nuclear Association*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/mineral-requirements-for-electricity-generation>

6. The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. *MIT Energy Initiative*. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 2018. URL: <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world>
7. The Full Costs of Electricity Provision. *OECD Nuclear Energy Agency*. Paris : OECD Publishing, 2018. URL: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_14974/the-full-costs-of-electricity-provision
8. Nuclear Energy Factsheet. *U.S. Department of Energy*. URL: <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/nuclear-energy-factsheet>
9. Nuclear Power and Secure Energy Transitions. *IEA*. Paris : International Energy Agency, 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>
10. Petroski R., Wood L. Sustainable, Full-Scope Nuclear Fission Energy at Planetary Scale. *Sustainability*. 2012. Vol. 4. Iss. 11. P. 3088–3123. DOI: <https://doi.org/10.3390/su4113088>
11. Koval V., Hrinchenko H., Fomenko A., Didenko N., Medvedovska Y. Compliance Management Implementation in Energy Sector Enterprises of the National Economy. In: *Renewables in the Circular Economy and Business. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer, 2025. P. 103–119. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-72174-8_6
12. Дуднієва Ю. Е., Раков А. С. Потенціал адаптивного самоуправління підприємствами для досягнення стратегічних орієнтирів сталого розвитку. *Наукові перспективи. Серія «Економіка»*. 2025. № 4. С. 590–602. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-4\(58\)-590-602](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-4(58)-590-602)
13. Losada-Agudelo M., Souyris S. Sustainable Operations Management in the Energy Sector: A Comprehensive Review of the Literature from 2000 to 2024. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Iss. 18. Art. 7999. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16187999>
14. Sovacool B. K. Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*. 2008. Vol. 36. Iss. 8. P. 2950–2963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
15. Locatelli G., Mancini M. Competitiveness of small-medium, new generation reactors: A comparative study on decommissioning. *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17* (July 12–16, 2009). Brussels, Belgium, 2009. Vol. 5. P. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE17-75254>
16. Дуднієва Ю., Артем'єв О. Ризик-менеджмент і комплаєнс у системі корпоративного управління на засадах сталого розвитку: інтегрований підхід. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 11. С. 194–204. DOI: <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-293-194-204>
17. Sulich A., Sołoduch-Pelc L. Changes in Energy Sector Strategies: A Literature Review. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 19. Art. 7068. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197068>
18. Grubler A. The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing. *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. Iss. 9. P. 5174–5188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003>
19. Ramana M. V. Nuclear power: Economic, safety, health, and environmental issues of near-term technologies. *Annual Review of Environment and Resources*. 2009. Vol. 34. P. 127–152. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.033108.092057>
20. Schneider M. et al. The World Nuclear Industry Status Report 2024. Paris ; London : A Mycle Schneider Consulting Project, 2024. URL: <https://www.world-nuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf>
21. Thomas S. The economics of nuclear power: Analysis of recent studies. *Nuclear Power: Myth and Reality*. 2005. No. 2. URL: https://www.nirs.org/wp-content/uploads/ch20/publications/nip5_thomas.pdf

REFERENCES

- U.S. Department of Energy. *Nuclear Energy Factsheet*. <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/nuclear-energy-factsheet>
- Dudnieva Yu. E. & Rakov A. S. (2025). Potentsial adaptivnoho samoupravlinnia pidpriemstvamy dlia dosiahnennia stratehichnykh oriientyriv staloho rozvytku [Potential of adaptive self-management of enterprises to achieve strategic guidelines for sustainable development]. *Naukovi perspektyvy. Seriya «Ekonomika»*, 4(58), 590–602. [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-4\(58\)-590-602](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-4(58)-590-602)
- Dudnieva Yu. & Artemiev O. (2025). Ryzhik-menedzhment i komplaiens u systemi korporativnoho upravlinnia na zasakh staloho rozvytku: inteirovani pidkhid [Risk management and compliance in corporate governance system based on sustainable development: integrated approach]. *Aktualni problemy ekonomiky*, 11, 194–204. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-293-194-204>
- Grubler A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing. *Energy Policy*, 38(9), 5174–5188. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003>
- IAEA (2015). *INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact from Depletion of Resources*. Vienna: IAEA. <https://www.iaea.org/publications/10748/inpromethodology-for-sustainability-assessment-of-nuclear-energy-systems-environmental-impact-from-depletion-of-resources>
- IAEA (2022). *Resource Requirements for Nuclear Power Infrastructure Development*. Vienna: IAEA. <https://www.iaea.org/publications/14882/resource-requirements-for-nuclear-power-infrastructure-development>

- IAEA (2024). *Long Term Operation of Nuclear Fuel Cycle Facilities*. Vienna: IAEA. <https://doi.org/10.61092/iaea.iygp-xse5>
- International Energy Agency (2022). *Nuclear Power and Secure Energy Transitions*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>
- Koval V., Hrinchenko H., Fomenko A., Didenko N. & Medvedovska Y. (2025). Compliance Management Implementation in Energy Sector Enterprises of the National Economy. *Renewables in the Circular Economy and Business* (p. 103–119). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72174-8_6
- Locatelli G. & Mancini M. (2009). Competitiveness of small-medium, new generation reactors: A comparative study on decommissioning. *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17* (July 12–16, 2009) (p. 57–66). Brussels, Belgium. <https://doi.org/10.1115/ICONE17-75254>
- Losada-Agudelo M. & Souyris S. (2024). Sustainable Operations Management in the Energy Sector: A Comprehensive Review of the Literature from 2000 to 2024. *Sustainability*, 18(16). <https://doi.org/10.3390/su16187999>
- Massachusetts Institute of Technology (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world>
- OECD Publishing (2018). *The Full Costs of Electricity Provision*. Paris: OECD Publishing. https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_14974/the-full-costs-of-electricity-provision
- Petroski R. & Wood L. (2012). Sustainable, Full-Scope Nuclear Fission Energy at Planetary Scale. *Sustainability*, 11(4), 3088–3123. <https://doi.org/10.3390/su4113088>
- Ramana M. V. (2009). Nuclear power: Economic, safety, health, and environmental issues of near-term technologies. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 127–152. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.033108.092057>
- Schneider M. (2024). *The World Nuclear Industry Status Report 2024*. Paris ; London: A Mycle Schneider Consulting Project. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2024-v2.pdf>
- Sovacool B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 8(36), 2950–2963. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
- Sulich A. & Sołoducho-Pelc L. (2022). Changes in Energy Sector Strategies: A Literature Review. *Energies*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/en15197068>
- Thomas S. (2005). The economics of nuclear power: Analysis of recent studies. *Nuclear Power: Myth and Reality*, 2. https://www.nirs.org/wp-content/uploads/ch20/publications/nip5_thomas.pdf
- World Nuclear Association. *Mineral Requirements for Electricity Generation*. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/mineral-requirements-for-electricity-generation>
- World Nuclear Association. *Nuclear Fuel Cycle Overview*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview>
- Стаття надійшла до редакції / Received: 03.05.2026
Статтю прийнято до публікації / Accepted: 16.05.2026
Оприлюднено / Published: 22.06.2026