МЕНЕДЖМЕНТ

https:/doi.org/10.26565/2311-2379-2026-110-10
УДК 338.45:005.5:621.311.25

Г. С. ГРІНЧЕНКО *
кандидат технічних наук, доцент,
доцент закладу вищої освіти кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142, e-mail: h.s.hrinchenko@karazin.ua

* Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ РОЗВИТКУ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

У статті досліджено особливості управління складними технологічними системами атомної енергетики в умовах розвитку національної економіки. Обґрунтовано, що атомні електростанції є багаторівневими соціально-технічними системами, ефективність функціонування яких визначається сукупною дією економічних, техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних факторів. Проведено аналіз існуючих підходів до оцінювання ефективності управління енергетичними системами та виявлено їх обмеження, зокрема фрагментарність і недостатнє врахування взаємозв'язків між показниками, які характеризують сталість функціонування об'єктів. Запропоновано інтегрований підхід до оцінювання ефективності управління, що базується на застосуванні кваліметричного підходу та формуванні інтегрального показника, який би враховував динамічні зміни в процесі експлуатації енергетичних об'єктів. Удосконалено метод оцінювання ефективності управління енергетичними системами шляхом врахування чотирьох груп факторів: економічних, техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних. Розроблено модель управління складними технологічними системами атомної енергетики, яка враховує синергетичний ефект взаємодії факторів та передбачає наявність зворотного зв'язку. Проведено апробацію запропонованого підходу на основі розрахунку інтегрального показника ефективності управління енергетичного об'єкту, на прикладі окремого енергоблоку атомної станції, що підтвердило його практичну значущість та можливість використання для підтримки прийняття управлінських рішень, прогнозування стану та забезпечення стійкості функціонування. Отримані результати можуть бути використані при вдосконаленні систем управління енергетичними підприємствами та забезпеченні ефективного розвитку атомної енергетики в умовах трансформації національної економіки.

Ключові слова: **атомна енергетика, складні технологічні системи, управління, кваліметрична оцінка, інтегральний показник, ефективність, енергетична безпека**.
JEL Classification: L94, Q40, Q48, M11, C44.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку національної економіки забезпечення стабільного та безпечного функціонування енергетичного сектору є одним із ключових чинників економічної стійкості держави. Енергетична галузь формує основу функціонування промисловості, транспорту, соціальної інфраструктури та інших сфер економічної діяльності. Особливе місце в структурі енергетичного комплексу займає атомна енергетика, яка забезпечує значну частку виробництва електроенергії та відіграє важливу роль у підтриманні енергетичної безпеки країни, що обумовлює підвищенні до ефективності управління об'єктами атомної енергетики, які характеризуються високим рівнем технологічної складності, значними капітальними витратами та підвищеними вимогами до безпеки експлуатації.

Атомні електростанції є складними технологічними системами, що поєднують у собі значну кількість взаємопов'язаних технічних, організаційних та інформаційних підсистем, а

© Грінченко Г.С., 2026

ефективність їх функціонування значною мірою залежить від якості управлінських рішень, координації виробничих процесів, а також здатності оперативно реагувати на внутрішні та зовнішні виклики. Разом із тим, розвиток національної економіки супроводжується структурними трансформаціями енергетичного сектору, інтеграцією до європейського енергетичного простору, а також необхідністю модернізації енергетичної інфраструктури.

Сучасні трансформаційні процеси енергетичного сектору зумовлені глобальними економічними, технологічними та екологічними викликами, що визначають нові підходи до формування енергетичної політики держав. Одним із ключових напрямів таких змін є перехід до більш стійких і низьковуглецевих моделей енергетичного розвитку, що передбачає підвищення енергоефективності, розширення використання відновлюваних джерел енергії та модернізацію енергетичної інфраструктури. Важливим чинником трансформації виступає також цифровізація енергетичних систем, впровадження інтелектуальних технологій управління, систем моніторингу та прогнозування функціонування енергетичних об'єктів. Поряд із цим посилюються вимоги до безпеки, надійності та економічної ефективності функціонування енергетичних підприємств, що зумовлює необхідність удосконалення механізмів управління складними технологічними системами, зокрема в галузі атомної енергетики, адже ефективний перехід неможливий без підсилення традиційних джерел енергії, що потребують відповідальних рішень щодо безпеки та стабільності функціонування та враховують як технологічні особливості функціонування енергетичних об'єктів, так і економічні фактори їх розвитку. У таких умовах енергетичний сектор поступово трансформується у високотехнологічну, інтегровану систему, орієнтовану на забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку національної економіки.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у сфері управління енергетичними системами, питання комплексного управління складними технологічними системами атомної енергетики з урахуванням економічних аспектів їх функціонування залишаються недостатньо дослідженими, що зумовлює необхідність подальшого розвитку теоретичних і методичних підходів до управління такими системами в контексті забезпечення ефективного розвитку національної економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика управління складними технологічними системами енергетики активно досліджується в сучасній науковій літературі у контексті трансформації енергетичного сектору, переходу до низьковуглецевої економіки та впровадження цифрових технологій. Значна кількість досліджень останнього десятиліття присвячена питанням цифровізації енергетики, інтеграції інноваційних технологій управління та підвищення ефективності функціонування енергетичних систем.

Так, у роботі (Nazari & Musilek, 2023) досліджено вплив цифрової трансформації на функціонування енергетичного сектору. Автори доводять, що використання цифрових технологій, зокрема великих даних, інтелектуальних систем управління та автоматизованих систем моніторингу, суттєво підвищує ефективність виробництва, передачі та споживання енергії, а також сприяє зниженню операційних витрат і підвищенню надійності енергетичних систем.

У контексті енергетичного переходу значну увагу приділяють застосуванню інтелектуальних технологій у сфері енергетичного менеджменту (Weigel & Fischedick, 2019). Зокрема, у комплексному огляді цифрових технологій для досягнення кліматично нейтральної енергетики показано, що такі технології, як штучний інтелект, блокчейн, цифрові двійники, хмарні обчислення та Інтернет речей, здатні суттєво підвищити ефективність управління енергетичними системами та забезпечити їхню гнучкість і стійкість (Md Meftahul Ferdaus et al, 2024). Інший напрям досліджень пов'язаний із цифровізацією енергетичних компаній та її впливом на загальну екологічну трансформацію галузі є питання повязані з «зеленим» розвитком та трансформацією енергетичного ринку. Так, у роботі (Ren & Xia, 2024) доведено, що цифровізація виступає важливим фактором переходу енергетичних компаній до «зеленої» моделі розвитку, оскільки сприяє оптимізації використання ресурсів, підвищенню енергоефективності та покращенню управління виробничими процесами.

У сучасних дослідженнях також розглядаються процеси «розумної» трансформації енергетичного сектору, що передбачають формування інтелектуальних енергетичних систем, використання smart grid-технологій та інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у процес управління енергетичною інфраструктурою. Зокрема, в роботі (Чигрин, О., Гавриленко,

О., Шевченко, К., 2023) автори підкреслюють, що розвиток smart-енергетики є одним із ключових напрямів модернізації енергетичної галузі та формування цифрової економіки. Разом з тим, автори (Quiroga-Barriga et al, 2025) зазначають, що розвиток атомної енергетики сьогодні супроводжується технологічними інноваціями, підвищенням стандартів безпеки та інтеграцією нових цифрових рішень для управління ядерними установками. Крім того, дослідники звертають увагу на трансформацію нормативно-правового регулювання у сфері атомної енергетики (Грачук, 2024), а саме зазначають, що сучасний розвиток технологій та інноваційних підходів у сфері використання атомної енергії потребує адаптації міжнародних та національних механізмів регулювання, а також створення нових підходів до управління, як технологічними, так і управлінськими ризиками (Дуднєва & Артем'єв, 2025).

Питання економіки та управління енергетичним сектором посідають теж важливе місце в сучасних наукових дослідженнях, а саме значна увага приділяється формуванню ефективних стратегій управління енергетичними системами, розвитку енергетичної політики та впровадженню інноваційних механізмів управління підприємствами енергетичної галузі. Зокрема, у дослідженні (Sulich & Sołoducho-Pelc, 2022) здійснено системний огляд стратегій розвитку енергетичного сектору. Автори доводять, що сучасні трансформаційні процеси в енергетиці пов'язані не лише з технологічними змінами, але й зі зміною управлінських підходів, спрямованих на забезпечення сталого розвитку, енергетичної безпеки та підвищення ефективності функціонування енергетичних підприємств. При цьому ключовими напрямами стратегічної трансформації галузі є розвиток відновлюваної енергетики, модернізація інфраструктури та впровадження нових моделей управління енергетичними компаніями.

Важливим напрямом сучасних досліджень є також аналіз впливу економічної політики на розвиток енергетичного сектору. Так, у роботі (Mushafiq et al, 2023) підкреслюється, що ефективна економічна політика держави є одним із ключових чинників підвищення енергоефективності та стимулювання інвестицій у розвиток енергетичної інфраструктури. Дослідники зазначають, що державні інструменти регулювання, зокрема економічні стимули, податкова політика та інвестиційні програми, відіграють важливу роль у забезпеченні сталого розвитку енергетичних систем.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з формуванням ефективних та адаптивних моделей управління підприємствами для досягнення сталого розвитку (Дуднєва & Раков, 2025). У сучасних роботах наголошується на необхідності інтеграції економічних, організаційних та технологічних підходів до управління енергетичними системами. Зокрема, результати систематичного огляду літератури з управління операційною діяльністю в енергетиці свідчать про зростання ролі стратегічного менеджменту, управління ланцюгами постачання, а також використання інструментів оцінювання ефективності та ключових показників діяльності (KPI) для забезпечення сталого функціонування енергетичних підприємств (Losada-Agudelo & Souyris, 2024).

Крім того, сучасні дослідження підкреслюють значення інноваційних технологій та концепції Industry 4.0 для розвитку енергетичного сектору. За результатами дослідження (García-Moreno & López-Ruiz, 2023), цифровізація енергетики, впровадження інтелектуальних систем управління, а також розвиток «розумних» енергетичних мереж (smart grids) створюють нові можливості для підвищення ефективності управління енергетичними системами та оптимізації виробничих процесів.

У сучасній науковій літературі також акцентується увага на соціально-економічних аспектах розвитку енергетичного сектору, зокрема на проблемах енергетичної справедливості, доступності енергоресурсів та рівномірного розподілу вигод від енергетичних реформ (Tardaskina, 2025). Дослідники підкреслюють, що питання енергетичної справедливості та доступу до енергії стають важливими складовими формування сучасної енергетичної політики та систем управління енергетичними ресурсами (Мірошниченко & Колотіліна, 2025).

Питання підвищення ефективності та безпеки функціонування атомної енергетики широко висвітлюється у сучасних наукових дослідженнях (Грінченко, 2025). Зокрема, у роботах підкреслюється, що розвиток атомної енергетики потребує поєднання технологічних інновацій, ефективного управління та вдосконалення механізмів державного регулювання з метою мінімізації технологічних і економічних ризиків функціонування енергетичних об'єктів (Koval et al, 2025; Hrinchenko et al, 2025). Дослідження Ingersoll D. та Carelli M. також акцентують увагу

на необхідності впровадження нових технологічних рішень та сучасних моделей управління для підвищення надійності й економічної ефективності ядерних енергетичних систем (Ingersoll & Carelli, 2020). Крім того, у звітах Міжнародного агентства з атомної енергії (IAEA) наголошується, що підвищення безпеки експлуатації атомних електростанцій пов'язане з модернізацією обладнання, впровадженням сучасних систем моніторингу та застосуванням ризик-орієнтованих підходів до управління технологічними процесами (IAEA, 2022). Таким чином, сучасні дослідження підтверджують необхідність інтеграції технологічних, організаційних та економічних підходів до управління атомною енергетикою з метою підвищення її ефективності та безпеки.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у сфері трансформації енергетичного сектору, питання управління складними технологічними системами атомної енергетики з позицій економіки та менеджменту залишаються недостатньо висвітленими. Більшість робіт зосереджена на технологічних аспектах функціонування енергетичних систем або на загальних питаннях енергетичної політики, тоді як комплексні економіко-управлінські підходи до управління складними технологічними системами атомної енергетики потребують подальшого розвитку.

Метою дослідження є дослідження особливостей управління складними технологічними системами атомної енергетики та визначення ефективних підходів до їх функціонування в умовах розвитку національної економіки з урахуванням економічних та безпекових факторів.

Методологія дослідження. Атомні електростанції (АЕС) слід розглядати як складні технологічні системи, що характеризуються багаторівневою структурою, наявністю значної кількості взаємопов'язаних підсистем, високим рівнем відповідальності та критичністю до відхилень у функціонуванні. Особливістю таких систем є те, що їх ефективність визначається не лише окремими технічними або економічними параметрами, а й сукупним впливом численних факторів, включаючи технологічні, організаційні, економічні та безпекові аспекти. Важливим є також урахування взаємодії цих факторів, яка може формувати синергетичний ефект, що посилює або, навпаки, знижує загальну ефективність функціонування системи.

У сучасних наукових дослідженнях підкреслюється, що управління складними енергетичними системами потребує застосування комплексних підходів до оцінювання їх функціонування. Зокрема, у роботах (Hollnagel, 2018) обґрунтовано концепцію системної безпеки, відповідно до якої надійність функціонування складних технологічних систем визначається не лише стабільністю окремих компонентів, а здатністю всієї системи адаптуватися до змін зовнішнього середовища та внутрішніх збурень. Аналогічно, (Sovacool, B.K., 2016) зазначає, що ефективність функціонування енергетичних систем формується під впливом комплексної взаємодії технічних, економічних і соціальних факторів, що потребує інтегрованого підходу до управління.

У практиці аналізу та управління складними технологічними системами застосовуються різні підходи до комплексного оцінювання. Зокрема, поширеним є використання систем показників ефективності (KPI), що дозволяють оцінювати окремі аспекти діяльності енергетичних підприємств, включаючи економічну результативність, технічну надійність та рівень безпеки. Разом із тим, як зазначається у дослідженні (Parmenter, 2015), використання ізольованих показників не дозволяє повною мірою врахувати взаємозв'язки між різними параметрами функціонування системи, що обмежує можливості прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Іншим підходом є застосування методів багатокритеріального аналізу, які дозволяють враховувати одночасно кілька критеріїв оцінювання. Так, у роботі (Taherdoost & Madanchian, 2023) підкреслюється ефективність методів багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) для аналізу складних систем. Однак їх практичне застосування часто ускладнюється необхідністю експертного визначення вагових коефіцієнтів та високою чутливістю результатів до суб'єктивних оцінок.

Крім того, у сфері енергетики активно застосовуються ризик-орієнтовані підходи до управління, які передбачають оцінювання ймовірності виникнення небажаних подій та їх наслідків. У звітах International Atomic Energy Agency (IAEA, 2022) наголошується на доцільності використання таких підходів для підвищення безпеки експлуатації атомних електростанцій. Водночас недоліком даного підходу є його переважна орієнтація на безпекові аспекти без достатнього врахування економічної ефективності функціонування системи.

Таким чином, існуючі підходи до аналізу та управління складними технологічними системами характеризуються фрагментарністю та недостатнім урахуванням інтегрованого впливу різних факторів, що зумовлює необхідність розроблення комплексних методологічних підходів до оцінювання ефективності управління атомними енергетичними системами.

З урахуванням виявлених недоліків існуючих підходів до аналізу та управління складними технологічними системами, у даному дослідженні запропоновано інтегрований підхід до оцінювання ефективності управління атомними електростанціями, який базується на поєднанні системного, ризик-орієнтованого та кваліметричного підходів.

Сутність запропонованого підходу полягає у розгляді атомної електростанції як багаторівневої соціально-технічної системи, в якій управління здійснюється з урахуванням взаємодії технологічних процесів, організаційних механізмів та економічних факторів. На відміну від традиційних підходів, що орієнтуються на окремі показники (технічні, безпекові або економічні), запропонований підхід передбачає їх інтеграцію в єдину систему оцінювання, що дозволяє врахувати синергетичний ефект взаємодії різних складових функціонування АЕС.

Ключовим елементом методології є застосування кваліметричної оцінки, яка дозволяє здійснити кількісне вимірювання якості управління складною технологічною системою на основі сукупності часткових показників. У межах даного підходу ефективність управління пропонується оцінювати за допомогою інтегрального показника, що формується на основі чотирьох основних груп критеріїв: економічної ефективності, техніко-технологічної надійності, рівня безпеки функціонування системи та соціально-організаційний показник.

Інтегральний показник ефективності управління може бути представлений у вигляді:

$$I_m = w_1 E + w_2 T + w_3 S + w_4 C, \quad (1)$$

де: E – узагальнений показник економічної ефективності (витрати експлуатації, рентабельність, інвестиційна привабливість); T – показник техніко-технологічного стану (надійність обладнання, рівень модернізації, безвідмовність); S – показник безпеки функціонування (ризики, аварійність, відповідність нормативним вимогам); C – соціально-організаційний показник, що враховує наявність кадрового потенціалу, компетентність фахівців, тощо; w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість кожного з критеріїв.

Використання кваліметричного підходу дозволяє забезпечити порівнянність різнорідних показників, що характеризують функціонування АЕС, а також врахувати вплив економічних параметрів на загальну ефективність управління. Зокрема, економічна складова інтегрального показника включає оцінювання витрат на експлуатацію, ефективність використання ресурсів, рівень інвестицій у модернізацію та економічні наслідки реалізації управлінських рішень.

Запропонований підхід також передбачає врахування взаємозв'язків між окремими складовими системи. Так, підвищення рівня безпеки може супроводжуватися зростанням витрат, тоді як модернізація технологічного обладнання здатна одночасно покращити як технічні, так і економічні показники. Саме тому інтегральна оцінка дозволяє врахувати такі взаємозалежності та забезпечити більш обґрунтоване прийняття управлінських рішень. Таким чином, запропонований методологічний підхід забезпечує комплексне оцінювання ефективності управління складними технологічними системами атомної енергетики, враховує синергетичний ефект взаємодії різних факторів та дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень у контексті розвитку національної економіки.

Основні результати дослідження. Атомна енергетика як складова національної економіки характеризується високим рівнем технологічної складності, капіталоємності та підвищеними вимогами до безпеки функціонування. Атомні електростанції (АЕС) є типовими представниками складних технологічних систем, що поєднують технічні, організаційні, економічні та соціальні підсистеми, взаємодія яких визначає загальну ефективність їх функціонування.

Особливістю таких систем є багаторівнева структура управління, що включає стратегічний, тактичний та операційний рівні, а також наявність значної кількості внутрішніх і зовнішніх зв'язків. При цьому функціонування АЕС відбувається в умовах високої

невизначеності, що зумовлена впливом як технічних факторів (зношеність обладнання, складність технологічних процесів), так і економічних (інвестиційна обмеженість, регуляторний вплив), екологічних та соціальних чинників. Важливою характеристикою атомної енергетики є наявність ефекту взаємодії факторів, що формує синергетичний вплив на результати функціонування системи. Зокрема, зміни у функціонуванні технологічного обладнання, заміна і переобладнання існуючих елементів, удосконалення підходів до діагностики та реагування на порушення нормальних умов експлуатації може одночасно підвищувати технічну надійність, зменшувати час планових робіт і суттєво позитивно впливати на економічну ефективність, тоді як недостатній рівень кваліфікації персоналу здатен нівелювати позитивний ефект від технічних удосконалень. У зв'язку з цим управління такими системами потребує комплексного підходу, що враховує взаємозалежність усіх ключових параметрів.

Для систематизації основних характеристик атомної енергетики як складної технологічної системи доцільно виділити ключові ознаки, що визначають специфіку управління (табл. 1).

Таблиця 1 – **Характеристики атомної енергетики як складної технологічної системи та їх вплив на управління**

Table 1 – **Characteristics of the nuclear power industry as a complex technological system and their impact on management**

Характеристика	Прояв у системі АЕС	Вплив на управління
Складність структури	Багаторівнева система з великою кількістю підсистем	Необхідність ієрархічного та інтегрованого управління
Високий рівень ризику	Потенційна аварійність, радіаційна небезпека	Впровадження ризик-орієнтованого підходу
Інерційність системи	Тривалий життєвий цикл енергоблоків	Орієнтація на стратегічне планування
Капіталоємність	Значні інвестиції в будівництво та модернізацію	Необхідність економічної оптимізації рішень
Технологічна складність	Складні фізико-технічні процеси	Використання спеціалізованих методів управління
Високі вимоги до безпеки	Жорстке нормативне регулювання	Постійний моніторинг і контроль
Людський фактор	Високі вимоги до кваліфікації персоналу	Розвиток кадрового потенціалу
Взаємозалежність факторів	Вплив технічних, економічних і організаційних параметрів	Необхідність комплексної оцінки ефективності

Джерело: складено автором / Source: compiled by the author

Таким чином, специфіка атомної енергетики як складної технологічної системи зумовлює необхідність застосування комплексних підходів до управління, що враховують багатофакторний характер її функціонування, взаємозв'язки між елементами системи та синергетичний ефект їх взаємодії. Це створює передумови для розроблення інтегрованих моделей оцінювання ефективності управління, які поєднують економічні, технічні, безпекові та соціально-організаційні аспекти.

Ефективність управління складними технологічними системами атомної енергетики визначається сукупністю взаємопов'язаних факторів, які формують результативність функціонування енергетичних об'єктів. З урахуванням специфіки атомної енергетики доцільно виокремити чотири ключові групи факторів: економічні, техніко-технологічні, безпекові та соціально-організаційні.

Економічні фактори відображають ефективність використання ресурсів, рівень витрат на виробництво електроенергії, інвестиційну привабливість об'єкта та загальну фінансову

результативність діяльності. Техніко-технологічні фактори характеризують технічний стан обладнання, рівень його модернізації, надійність та безвідмовність функціонування. Безпекові фактори пов'язані з рівнем ризиків, відповідністю нормативним вимогам, частотою порушень та аварійних ситуацій. Соціально-організаційні фактори включають кадровий потенціал, рівень кваліфікації персоналу, ефективність управлінських структур та організаційну культуру.

З метою практичного застосування запропонованого підходу доцільно здійснити узагальнення зазначених факторів у вигляді системи показників, що можуть бути використані для оцінювання ефективності управління на рівні окремого енергоблоку АЕС (табл. 2).

Таблиця 2 – **Система показників оцінювання ефективності управління енергоблоком АЕС**

Table 2 – **Performance indicator system for assessing the management of a nuclear power plant unit**

Показник	Одиниця виміру	Орієнтовне значення	Норматив / ціль
Економічні фактори (E)			
Собівартість електроенергії	грн/кВт•год	1,65	≤ 1,80
Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП)	%	78	≥ 75
Рентабельність діяльності	%	12	≥ 10
Обсяг інвестицій у модернізацію	млн грн/рік	450	≥ 400
Техніко-технологічні фактори (T)			
Коефіцієнт готовності обладнання	%	92	≥ 90
Середній термін експлуатації обладнання	років	28	≤ 30
Кількість відмов на рік	од.	3	≤ 5
Рівень модернізації обладнання	%	65	≥ 60
Безпекові (S)			
Кількість порушень у роботі	од./рік	2	≤ 3
Індекс ядерної безпеки	од. (0–1)	0,92	≥ 0,9
Частота аварійних зупинок	од./рік	1	≤ 2
Відповідність нормативним вимогам	%	98	≥ 95
Соціально-організаційні фактори (C)			
Частка персоналу з високою кваліфікацією	%	85	≥ 80
Середній стаж роботи персоналу	років	15	≥ 10
Рівень плинності кадрів	%	6	≤ 8
Рівень підвищення кваліфікації	% персоналу/рік	40	≥ 35

Джерело: складено автором / Source: compiled by the author

Аналіз наведених показників свідчить, що ефективність управління енергоблоком АЕС формується під впливом не окремих параметрів, а їх сукупності. При цьому між різними групами факторів існують тісні взаємозв'язки: покращення технічного стану обладнання сприяє підвищенню безпеки та економічної ефективності, тоді як високий рівень підготовки персоналу позитивно впливає на всі складові функціонування системи. Зазначене обґрунтовує доцільність використання інтегрального підходу до оцінювання ефективності управління, який дозволяє врахувати багатофакторний характер функціонування атомної енергетики. У цьому контексті запропонований інтегральний показник (1) дозволяє узагальнити вплив економічних,

техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних факторів і сформувати комплексну оцінку ефективності управління енергоблоком.

З метою практичної апробації запропонованого підходу здійснено розрахунок інтегрального показника ефективності управління енергоблоком атомної електростанції на основі узагальнених даних, наведених у табл. 2. Для забезпечення порівнянності показників проведено їх нормування за відношенням до цільових (нормативних) значень.

Нормовані значення показників визначаються за формулами:

- для стимулюючих показників (чим більше, тим краще): $x_i = \frac{X_i}{X_{норм}}$;
- для дестимулюючих показників (чим менше, тим краще): $x_i = \frac{X_{норм}}{X_i}$.

На основі цього було отримано узагальнені значення за кожною групою факторів:

- економічна складова: $E = 0{,}94$;
- техніко-технологічна складова: $T = 0{,}96$;
- безпекова складова: $S = 0{,}97$;
- соціально-організаційна складова: $C = 0{,}95$.

Для розрахунку інтегрального показника прийнято вагові коефіцієнти з урахуванням пріоритетності безпеки та технічної надійності в атомній енергетиці: $w_1 = 0{,}25;\ w_2 = 0{,}30;\ w_3 = 0{,}30;\ w_4 = 0{,}15.$

Тоді інтегральний показник ефективності управління становитиме:

$$I_m = 0{,}25 \cdot 0{,}94 + 0{,}30 \cdot 0{,}96 + 0{,}30 \cdot 0{,}97 + 0{,}15 \cdot 0{,}95 = \\ = 0{,}235 + 0{,}288 + 0{,}291 + 0{,}142 = 0{,}956$$

Отримане значення інтегрального показника $I_m = 0{,}956$ свідчить про високий рівень ефективності управління енергоблоком, що зумовлено збалансованістю економічних, техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних факторів. Водночас результати розрахунку дозволяють виявити резерви підвищення ефективності, зокрема у сфері економічної оптимізації витрат та подальшого розвитку кадрового потенціалу.

Застосування інтегрального показника дає можливість не лише оцінити поточний стан системи управління, але й здійснювати порівняльний аналіз різних енергоблоків або сценаріїв розвитку, що є важливим інструментом підтримки прийняття управлінських рішень. Отримані результати інтегрального оцінювання ефективності управління дозволяють сформувати узагальнену модель управління складними технологічними системами атомної енергетики, яка враховує багатофакторний характер їх функціонування та взаємодію ключових складових (рис. 1).

Запропонована модель базується на інтеграції чотирьох груп факторів – економічних, техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних – у межах єдиної системи управління, орієнтованої на досягнення збалансованих результатів функціонування. На відміну від існуючих підходів, дана модель враховує не лише вплив окремих показників, але й їх взаємозалежність, що проявляється у формуванні синергетичного ефекту.

Модель передбачає реалізацію управлінських процесів на трьох рівнях: стратегічному (формування довгострокових напрямів розвитку та інвестиційної політики); тактичному (оптимізація ресурсів, планування модернізації); операційному (забезпечення безперервності та безпеки технологічних процесів).

Важливою складовою моделі є наявність зворотного зв’язку, який забезпечує адаптивність системи управління до змін зовнішнього середовища та внутрішніх параметрів функціонування. Результати оцінювання інтегрального показника використовуються для коригування управлінських рішень, що дозволяє підвищити гнучкість та ефективність управління.

Запропонована модель відображає процес формування ефективності управління як результату взаємодії чотирьох груп факторів, що інтегруються у вигляді єдиного показника. Наявність зворотного зв'язку забезпечує адаптивність системи управління до змін зовнішнього середовища та внутрішніх умов функціонування. Врахування синергетичного ефекту дозволяє підвищити точність оцінювання та обґрунтованість управлінських рішень.

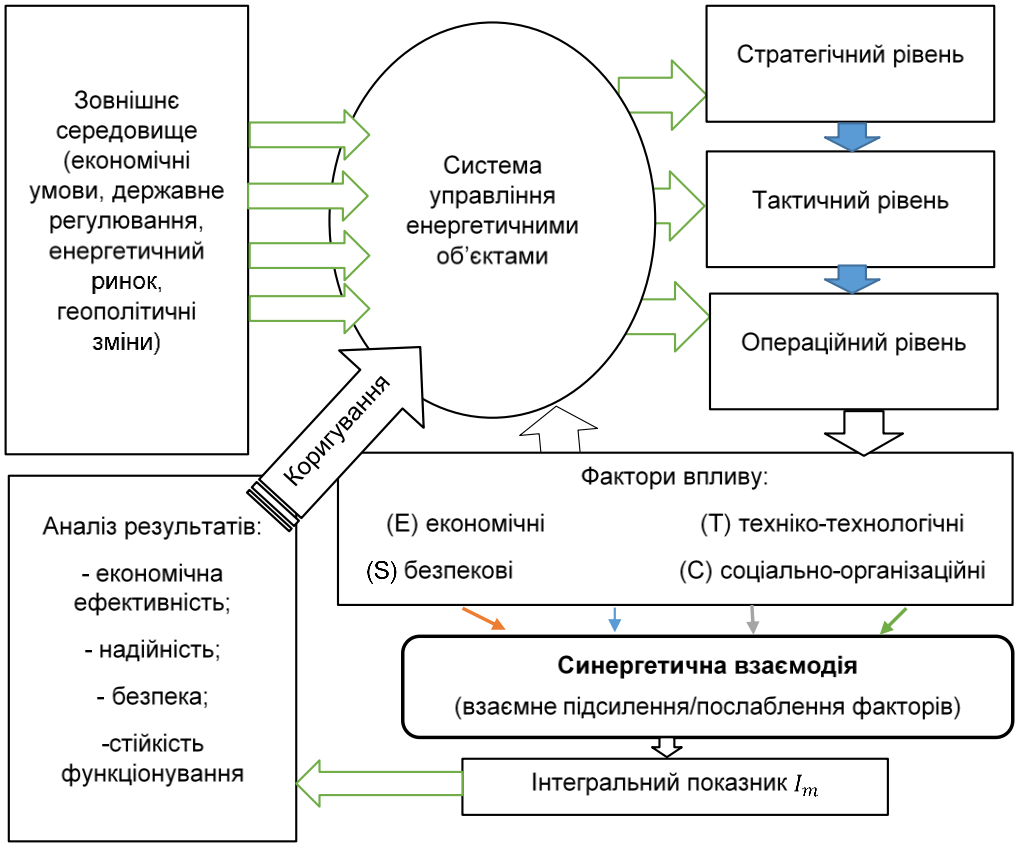

Рис. 1. Модель управління складною технологічною системою атомної енергетики з урахуванням синергетичного ефекту
Fig. 1. A model for managing a complex technological system in the nuclear power industry, taking into account synergistic effects

Джерело: складено автором / Source: compiled by the author

Висновки. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано, що атомна енергетика є складною технологічною системою, ефективність функціонування якої визначається сукупною дією економічних, техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних факторів. Доведено, що традиційні підходи до оцінювання діяльності енергетичних об'єктів, орієнтовані на окремі показники, не забезпечують повною мірою врахування взаємозв'язків між складовими системи та синергетичного ефекту їх взаємодії.

У роботі запропоновано інтегрований підхід до оцінювання ефективності управління складними технологічними системами атомної енергетики, який базується на застосуванні кваліметричної оцінки та передбачає формування інтегрального показника з урахуванням чотирьох ключових груп факторів: економічних, техніко-технологічних, безпекових та соціально-організаційних. На відміну від існуючих підходів, запропонований метод дозволяє

комплексно врахувати як кількісні, так і якісні характеристики функціонування системи управління.

Практична апробація підходу шляхом розрахунку інтегрального показника ефективності управління показала високий рівень узгодженості між окремими складовими системи та підтвердила доцільність використання запропонованого інструментарію для оцінювання ефективності функціонування енергоблоків атомних електростанцій. Встановлено, що врахування взаємодії факторів дозволяє більш точно визначати резерви підвищення ефективності, зокрема у сфері оптимізації витрат, модернізації обладнання та розвитку кадрового потенціалу.

Розроблена модель управління складними технологічними системами атомної енергетики відображає багаторівневий характер управління та забезпечує інтеграцію ключових факторів впливу з урахуванням синергетичного ефекту. Наявність зворотного зв'язку у моделі створює передумови для адаптивного управління та підвищення обґрунтованості управлінських рішень в умовах змінного зовнішнього середовища.

Отримані результати мають практичне значення та можуть бути використані при розробленні стратегій розвитку енергетичних підприємств, удосконаленні систем управління атомними електростанціями, а також у процесах прийняття управлінських рішень на галузевому рівні.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методів визначення вагових коефіцієнтів інтегрального показника, розширенням переліку показників оцінювання та апробацією запропонованого підходу на основі реальних даних функціонування енергетичних об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nazari Z., Musilek P. Impact of Digital Transformation on the Energy Sector: A Review. Algorithms. 2023. Vol. 16, № 4. P. 211. https://doi.org/10.3390/a16040211
2. Weigel P., Fischedick M. Review and Categorization of Digital Applications in the Energy Sector. Applied Sciences. 2019. Vol. 9, № 24. P. 5350. https://doi.org/10.3390/app9245350
3. Ferdaus M., Dam T., Anavatti S., & Das S. Digital technologies for a net-zero energy future: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 202. P. 114681. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114681
4. Ren Y., Xia Y. Research on the impact of digitalization on energy companies' green transition: new insights from China. Energy Res. 2024. Vol. 12. P. 1421832. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1421832
5. Чигрин О., Гавриленко О., Шевченко К. Розумна трансформація енергетики: основні принципи та складові. Вісник економіки. 2023. № 2. С. 204–216. https://doi.org/10.35774/visnyk2023.02.204
6. Quiroga-Barriga H., Nápoles-Rivera F., Ramírez-Márquez C., Ponce-Ortega J. M. Nuclear Energy as a Strategic Resource: A Historical and Technological Review. Processes. 2025. Vol. 13, № 8. P. 2654. https://doi.org/10.3390/pr13082654
7. Грачук В. С. Правове регулювання енергетичних правовідносин в Україні в контексті сталого розвитку. Науковий вісник Ужгородського Національного Університету. Серія «Право». 2024. Вип. 86, ч. 3. С. 107–113. https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.16
8. Дуднєва Ю., Артем'єв О. Ризик-менеджмент і комплаєнс у системі корпоративного управління на засадах сталого розвитку: інтегрований підхід. Актуальні проблеми економіки. 2025. № 11 (293). С. 194–204. https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-293-194-204
9. Sulich A., Sołoducho-Pelc L. Changes in Energy Sector Strategies: A Literature Review. Energies. 2022. Vol. 15, № 19. P. 7068. https://doi.org/10.3390/en15197068
10. Mushafiq M., Arisar M. M. K., Tariq H., Czapp S. Energy Efficiency and Economic Policy: Comprehensive Theoretical, Empirical, and Policy Review. Energies. 2023. Vol. 16, № 5. P. 2381. https://doi.org/10.3390/en16052381
11. Дуднєва Ю., Раков А. Потенціал адаптивного самоуправління підприємствами для досягнення стратегічних орієнтирів сталого розвитку. Наукові перспективи. Серія «Економіка». 2025. № 4(58). С. 590–602. https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-4(58)-590-602

12. 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, № 18. P. 7999. https://doi.org/10.3390/su16187999
13. García-Moreno S., López-Ruiz V.-R. A Review of the Energy Sector as a Key Factor in Industry 4.0: The Case of Spain. Energies. 2023. Vol. 16, № 11. P. 4446. https://doi.org/10.3390/en16114446
14. Tardaskina T. The digital model of development of socio-economic systems of Ukraine. Journal of Innovations and Sustainability. 2025. Vol. 9, № 1. P. 05. https://doi.org/10.51599/is.2025.09.01.05
15. Мірошниченко Є., Колотіліна О. Бібліометричний аналіз досліджень сталого соціально-економічного та екологічного розвитку. Економіка та суспільство. 2025. № 78. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-78-145
16. Грінченко Г. С. Методологічні підходи управління сталим розвитком у сучасних енергетичних системах. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2025. Том 4, № 112. С. 68–80. https://doi.org/10.31713/ve420256
17. Koval V., Hrinchenko H., Fomenko A., Didenko N., Medvedovska Y. Compliance Management Implementation in Energy Sector Enterprises of the National Economy / In: Koval V. (eds) Renewables in the Circular Economy and Business. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Cham: Springer, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72174-8_6
18. Hrinchenko H., Prokopenko O., Karbekova A., Antonenko N., Kovshun N., Kubakh T., Poliushkin S. Sustainable Lifespan Re-Extension Management of Energy Facilities: Economic Assessment and Decision-Making Model for Phased Decommissioning. Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 4610. https://doi.org/10.3390/su17104610
19. Ingersoll D., Carelli M. Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. Woodhead Publishing, 2020. https://doi.org/10.1016/C2019-0-00070-2
20. International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear Power and Sustainable Development. Vienna: IAEA, 2022. URL: https://www.iaea.org/publications/11084/nuclear-power-and-sustainable-development
21. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management. CRC Press, 2018. https://doi.org/10.1201/9781315607511
22. Sovacool B. K. The history and politics of energy transitions: Comparing contested views and finding common ground. WIDER Working Paper 2016/81. Helsinki: UNU-WIDER, 2016. https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2016/124-6
23. Parmenter D. Key Performance Indicators – Developing, Implementing, and Using Winning KPIs. 3rd Edition. Hoboken: Wiley, 2015. https://doi.org/10.1002/9781119019855
24. Taherdoost H., Madanchian M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia. 2023. Vol. 3, № 1. P. 77–87. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006

Конфлікт інтересів: автор повідомляє про відсутність конфлікту інтересів.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2026
Стаття рекомендована до друку 20.04.2026
Стаття опублікована 25.05.2026

REFERENCES

1. Nazari, Z., & Musilek, P. (2023). Impact of digital transformation on the energy sector: A review. Algorithms, 16(4), 211. https://doi.org/10.3390/a16040211
2. Weigel, P., & Fischedick, M. (2019). Review and categorization of digital applications in the energy sector. Applied Sciences, 9(24), 5350. https://doi.org/10.3390/app9245350
3. Ferdaus, M., Dam, T., Anavatti, S., & Das, S. (2024). Digital technologies for a net-zero energy future: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 202, 114681. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114681
4. Ren, Y., & Xia, Y. (2024). Research on the impact of digitalization on energy companies' green transition: New insights from China. Frontiers in Energy Research, 12, 1421832. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1421832

5. Chygryn, O., Gavrylenko, O., & Shevchenko, K. (2023). Smart transformation of the energy industry: basic principles and components. Herald of Economics, 2, 204–216. https://doi.org/10.35774/visnyk2023.02.204 (in Ukrainian)

6. Quiroga-Barriga, H., Nápoles-Rivera, F., Ramírez-Márquez, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2025). Nuclear energy as a strategic resource: A historical and technological review. Processes, 13(8), 2654. https://doi.org/10.3390/pr13082654

7. Hrachuk, V. S. (2024). Legal regulation of energy relations in Ukraine in the context of sustainable development. Uzhhorod National University Herald. Series: Law, 86(3), 107–113. https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.16 (in Ukrainian)

8. Dudnieva, I., & Artemiev, O. (2025). Risk management and compliance in the corporate governance system based on the principles of sustainable development: an integrated approach. Actual problems of economics, 11(293), 194–204. https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-293-194-204 (in Ukrainian)

9. Sulich, A., & Sołoducho-Pelc, L. (2022). Changes in energy sector strategies: A literature review. Energies, 15(19), 7068. https://doi.org/10.3390/en15197068

10. Mushafiq, M., Arisar, M. M. K., Tariq, H., & Czapp, S. (2023). Energy efficiency and economic policy: Comprehensive theoretical, empirical, and policy review. Energies, 16(5), 2381. https://doi.org/10.3390/en16052381

11. Dudnieva, I., & Rakov, A. (2025). Adaptive self-management potential of enterprises in achieving strategic guidelines for sustainable development. Scientific perspectives. SERIES «Economics», 4(58), 590–602. https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-4(58)-590-602 (in Ukrainian)

12. Losada-Agudelo, M., & Souyris, S. (2024). Sustainable operations management in the energy sector: A comprehensive review of the literature from 2000 to 2024. Sustainability, 16(18), 7999. https://doi.org/10.3390/su16187999

13. García-Moreno, S., & López-Ruiz, V.-R. (2023). A review of the energy sector as a key factor in Industry 4.0: The case of Spain. Energies, 16(11), 4446. https://doi.org/10.3390/en16114446

14. Tardaskina, T. (2025). The digital model of development of socio-economic systems of Ukraine. Journal of Innovations and Sustainability, 9(1), 05. https://doi.org/10.51599/is.2025.09.01.05

15. Miroshnychenko, Y., & Kolotilina, O. (2025). Bibliometric analysis of research on sustainable socio-economic and environmental development. Economy and Society, (78).https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-78-145 (in Ukrainian)

16. Hrinchenko, H. (2025). Methodological approaches to sustainable development management in modern energy systems. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering, 4(112), 68–80. https://doi.org/10.31713/ve420256 (in Ukrainian)

17. Koval, V., Hrinchenko, H., Fomenko, A., Didenko, N., & Medvedovska, Y. (2025). Compliance management implementation in energy sector enterprises of the national economy. In V. Koval (Ed.), Renewables in the circular economy and business (pp. xx–xx). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72174-8_6

18. Hrinchenko, H., Prokopenko, O., Karbekova, A., Antonenko, N., Kovshun, N., Kubakh, T., & Poliushkin, S. (2025). Sustainable lifespan re-extension management of energy facilities: Economic assessment and decision-making model for phased decommissioning. Sustainability, 17, 4610. https://doi.org/10.3390/su17104610

19. Ingersoll, D., & Carelli, M. (2020). Handbook of small modular nuclear reactors. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/C2019-0-00070-2

20. International Atomic Energy Agency. (2022). Nuclear power and sustainable development. Vienna: IAEA. Retrieved from https://www.iaea.org/publications/11084/nuclear-power-and-sustainable-development

21. Hollnagel, E. (2018). Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315607511

22. Sovacool, B. K. (2016). The history and politics of energy transitions: Comparing contested views and finding common ground. WIDER Working Paper 2016/81. Helsinki: UNU-WIDER. https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2016/124-6

23. Parmenter, D. (2015). Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs (3rd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119019855

24. Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. Encyclopedia, 3(1), 77–87. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

The article was received by the editors 02.03.2026
The article is recommended for printing 20.04.2026
The article was published on 25.05.2026

H. HRINCHENKO *, PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies,
https://orcid.org/0000-0002-6498-6142, h.s.hrinchenko@karazin.ua

* V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

FEATURES OF MANAGING COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEMS IN THE NUCLEAR ENERGY SECTOR IN THE CONTEXT OF NATIONAL ECONOMIC DEVELOPMENT

The article examines the features of managing complex technological systems in nuclear power engineering under the conditions of national economic development. It is substantiated that nuclear power plants are multi-level socio-technical systems whose performance depends on the combined influence of economic, technical-technological, safety, and socio-organizational factors. The paper analyzes existing approaches to assessing the effectiveness of energy system management and identifies their limitations, particularly fragmentation and insufficient consideration of interdependencies between indicators. An integrated approach to evaluating management efficiency is proposed, based on the application of qualimetric assessment and the formation of an integral indicator. The method for assessing management efficiency is improved by incorporating four groups of factors: economic, technical-technological, safety, and socio-organizational. A management model for complex technological systems in nuclear energy is developed, taking into account the synergistic effect of factor interaction and incorporating feedback mechanisms. The proposed approach is tested through the calculation of an integral management efficiency indicator, which confirms its practical applicability and usefulness for decision-making support. The results obtained can be applied to improve management systems of energy enterprises and ensure the effective development of nuclear energy in the context of national economic transformation.

Keywords: **nuclear energy, complex technological systems, management, qualimetric assessment, integral indicator, efficiency, energy security**.

JEL Classification: L94, Q40, Q48, M11, C44.

Як цитувати: Грінченко Г.С. Особливості управління складними технологічними системами атомної енергетики в умовах розвитку національної економіки. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Економічна»*. 2026. Вип. 110. С. 120–132. https://doi.org/10.26565/2311-2379-2026-110-10

In cites: Hrinchenko H. (2026). Features of managing complex technological systems in the nuclear energy sector in the context of national economic development. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Economic Series*, (110), 120–132. https://doi.org/10.26565/2311-2379-2026-110-10 (in Ukrainian)