



А. О. Капустянський¹, М. Ф. Заяць¹, К. О. Романова²

¹ Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

² НТУ України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

СИСТЕМНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗАДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОГЕНЕРУВАННЯ

Наразі актуальною проблемою є підвищення ефективності функціонування сучасних енергетичних систем, що зумовлено необхідністю зниження споживання первинних енергоресурсів, підвищення надійності енергогенерування та мінімізації екологічного навантаження. Встановлено доцільність застосування системного підходу до модернізації теплових електростанцій на основі інтеграції технології цифрових двійників із процесами оновлення генеруючого обладнання та оптимізації режимів його експлуатації. З'ясовано особливості функціонування теплових електростанцій у конденсаційному та когенераційному режимах навантаження із використанням методів системного та порівняльного аналізу, а також цифрового моделювання енергетичних процесів. Охарактеризовано відмінності формування енергетичного та теплового балансів зазначених режимів генерування, що визначають ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів. Встановлено, що конденсаційні електростанції орієнтовані на максимізацію виробництва електричної енергії шляхом підвищення ефективності турбоустановок й оптимізації теплового режиму конденсаційних систем, тоді як когенераційні станції забезпечують одночасне виробництво електричної та теплової енергії з урахуванням збалансованого використання різних видів палива. Оцінено вплив конструктивних й експлуатаційних параметрів конденсаторів на показники роботи енергоблоків, зокрема – встановлено залежність їх характеристик від температури охолоджувальної води на вході та кількості теплообмінних трубок. З'ясовано можливості підвищення енергоефективності енергогенеруючих комплексів шляхом інтеграції додаткових генеруючих потужностей, зокрема – газопоршневих і газотурбінних установок, а також малих модульних ядерних реакторів. Встановлено, що застосування газопоршневих установок дає змогу досягати економії первинної енергії до 30-40 %, тоді як використання газотурбінних установок забезпечує високі показники ефективності за роботи на повному навантаженні. Оцінено потенціал використання технології цифрових двійників для прогнозування режимів роботи енергетичного обладнання, оптимізації енергетичних потоків і підвищення надійності функціонування теплових електростанцій.

Ключові слова: нормативна документація; конденсаційний та когенераційний режими роботи; коефіцієнт корисної дії; газопоршневі та газотурбінні установки; малі модульні ядерні реактори.

Вступ / Introduction

Для сучасних енергетичних систем характерні зростання складності та нагальна потреба забезпечення високої ефективності, надійності й гнучкості генерації електроенергії. Теплові електростанції (ТЕС) залишаються ключовим елементом енергетичного балансу, проте для них характерні значні втрати первинної енергії, обмежена адаптивність до змін навантаження та залежність від стабільності паливостачання. У світовій науковій літературі питання підвищення ефективності енергогенерування, оптимізації режимів роботи та цифровізації енергетичних об'єктів досліджено у працях таких науковців, як I. Goodfellow, K. Schwab, M. Grieves, а також у численних дослідженнях, в яких розглянуто

концепцію цифрових двійників у промисловості.

Наразі розроблено підходи до цифрового моделювання окремих енергетичних установок, методи прогнозування технічного стану обладнання та оптимізації режимів його роботи. Водночас, недостатньо дослідженими залишаються питання комплексної інтеграції цифрових двійників у структуру теплових електростанцій з урахуванням різних режимів їх функціонування, а також взаємодії з додатковими генеруючими потужностями.

Актуальність дослідження полягає у необхідності розроблення системного підходу до створення цифрових двійників для ТЕС, газопоршневих установок (ГПУ), газотурбінних установок (ГТУ) та малих модульних ядерних реакторів (ММЯР), що забезпечить підвищення ефективності, надійності та адаптивності енергоге-

© Copyright 2026 by the author(s)

Капустянський Андрій Олександрович, канд. техн. наук, ст. викладач, кафедра теплоенергетики, теплових та атомних електростанцій. Email: kapustyansky@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2771-2505>

Заяць Марія Федорівна, ст. викладач, кафедра теплоенергетики, теплових та атомних електростанцій.

Email: marzayf@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8899-9036>

Романова Катерина Олександрівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра теплової та альтернативної енергетики.

Email: romanova_ko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-9738-3383>

Цитування за ДСТУ: Капустянський А. О., Заяць М. Ф., Романова К. О. Системно-інформаційний підхід до створення цифрових двійників теплових електростанцій задля підвищення ефективності та надійності енергогенерування. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 2. С. 159–167.

Citation APA: Kapustianskyi, A. O., Zayats, M. F., & Romanova, K. O. (2026). A system-based approach to the development of digital twins for thermal power plants to improve the efficiency and reliability of power generation. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(2), 159–167. <https://doi.org/10.36930/40360218>

нерування за умов динамічних навантажень і ресурсних обмежень.

Об'єкт дослідження – створення цифрових двійників теплових електростанцій задля підвищення ефективності та надійності енергогенерування.

Предмет дослідження – методи і засоби створення цифрових двійників теплових електростанцій для моніторингу та управління енергоблоками, прогнозного їх обслуговування та діагностики відмов, що уможливають встановлення закономірностей зміни теплового балансу приміщень і ККД за переходу між конденсаційним та когенераційним режимами роботи.

Мета роботи – розробити системно-інформаційний підхід до створення цифрових двійників енергоустановок задля підвищення ефективності та надійності енергогенерування, що дасть змогу оптимізувати режими роботи енергоблоків, прогнозувати їх технічний стан та забезпечити адаптацію до умов динамічних навантажень і складу генеруючих потужностей.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати енергетичні характеристики об'єктів енергогенерування у конденсаційному та когенераційному режимах навантаження задля визначення ключових факторів, що впливають на ефективність їх роботи, зокрема – параметрів турбоустановок, конденсаційних систем та якості робочого середовища;
- дослідити вплив експлуатаційних параметрів конденсаційних систем на тепловий баланс й ефективність роботи об'єктів енергогенерування, що дасть змогу кількісно оцінити зміну тиску насичення у конденсаторі та визначити ступінь впливу температури охолоджувальної води на ефективність роботи турбінного обладнання і загальний ККД енергоблоку;
- оцінити ефективність когенераційного режиму роботи об'єктів енергогенерування, що дасть можливість застосувати цифрові двійники для прогнозування режимів функціонування, оптимізації енергетичних процесів, підвищення їх ККД та надійності;
- здійснити оцінювання можливості інтеграції додаткових генеруючих потужностей у структуру теплових електростанцій шляхом визначення їх впливу на енергоефективність, витрату палива та екологічні показники, що дасть змогу окреслити обмеження й перспективи подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження модернізації ТЕС та застосування цифрових двійників охоплюють міжнародний і національний досвід. У роботі [7] автори показали, що впровадження інноваційних технологій у системи теплопостачання українських військових містечок підвищує ефективність та надійність роботи, зменшує енергетичні витрати та підвищує стійкість інфраструктури за умов війни.

Науковці у роботі [20] узагальнили міжнародний досвід застосування цифрових двійників у великих енергетичних установках, демонструючи ефективність у процесах моніторингу, прогнозного обслуговування та діагностики відмов, проте вказали на прогалини у практичній реалізації.

Автори у дослідженні [32] зазначили, що цифрові двійники для керування процесами горіння у ТЕС підвищують точність моніторингу, оптимізують режими роботи та забезпечують прогнозне управління на базі штучного інтелекту.

У роботі [30] автори показали, що гібридне моделювання ТЕС із поєднанням фізичних механізмів та експлуатаційних даних створює високоточні цифрові двійники з похибкою тільки 0,79 % у широкому діапазоні режимів.

Згідно з результатами, наведеними у роботі [18], встановлено, що підвищення ефективності та надійності конденсаційних ТЕС на вугіллі можливе завдяки оптимізації процесу експлуатації та технічного обслуговування, що підвищує гнучкість системи у переході до відновлюваної енергетики.

Результати, наведені у роботі [1], свідчать про те, що когенераційні ТЕС дають можливість оптимально розподіляти паливо між виробництвом електроенергії та опрісненням води, підвищуючи ефективність використання ресурсів. Виконаний у роботі [11] аналіз дав змогу вказати на перевищення забруднювальних речовин у роботі вугільних ТЕС над національними стандартами, що підтверджує необхідність контролю та оптимізації викидів парникових газів.

У роботі [10] автори вказали на те, що уніфікований онлайн-фреймворк цифрового двійника забезпечує синхронізацію параметрів, оптимізацію керування та візуалізацію процесів у теплових енергоблоках. Згідно з результатами дослідження [3] було встановлено, що цифрові двійники підвищують ефективність, надійність та екологічність роботи різних енергетичних систем, хоча практичне впровадження ще стикається зі значними викликами.

Отримані в роботі [2] результати дослідження демонструють, що використання платформ, таких як Nvidia Omniverse, для моделювання роботи цифрових двійників інтегрує процеси моделювання, візуалізації та реальні дані, підвищуючи ефективність процесу проектування, розроблення та експлуатації складних енергетичних систем.

Отже, попередні дослідження фокусуються на цифровій трансформації великих енергетичних систем і не враховують специфічних умов воєнного стану та потреби адаптації енергетичної інфраструктури до кризових викликів.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження виконано в Україні упродовж 2025 року із застосуванням методів системного та порівняльного аналізу, моделювання енергетичних процесів та цифрового моделювання. У роботі проаналізовано нормативну документацію щодо енергетичних характеристик теплових електростанцій із врахуванням конденсаційного та когенераційного режимів їх роботи [12, 28]. Для оцінювання впливу експлуатаційних параметрів використано моделювання теплових характеристик конденсатора з урахуванням температури охолоджувальної води та конфігурації теплообмінної поверхні [14]. Додатково застосовано методи порівняльного аналізу та енергетичного моделювання для оцінювання можливостей інтеграції додаткових генераційних потужностей (ГПУ, ГТУ та ММЯР) і використання цифрових двійників для оптимізації режимів роботи ТЕС, підвищення енергоефективності та зниження екологічного навантаження [9, 15, 25, 31].

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Аналіз нормативної документації енергетичних характеристик ТЕС. Забезпечення енергетичної безпеки України потребує підвищення ефективності та на-

дійності роботи ТЕС. Модернізація наявних станцій із цифровими двійниками дає змогу оптимізувати роботу обладнання, прогнозувати режими навантаження та підвищувати ККД генераційних установок. Ключовим аспектом оцінювання є порівняння режимів функціонування: конденсаційного та когенераційного.

Конденсаційна ТЕС орієнтована на максимальну генерацію електроенергії з охолодженням пари у конденсаторі, забезпечуючи високий ККД електричної частини, проте тепло не використовується додатково. Когенераційна ТЕС одночасно виробляє електроенергію та тепло для технологічних або побутових потреб, підвищуючи загальну ефективність палива, але вимагає дещо складнішого контролю енергетичних потоків і режимів навантаження [12, 28]. Різниця між режимами навантаження стосується не тільки призначення енергії, а й технічних і нормативних вимог щодо управління потоками, параметрів пари та конденсату, регулювання обладнання та інтеграції цифрових систем моделювання (табл. 1).

Табл. 1. Порівняння характеристик конденсаційних і когенераційних ТЕС / Comparison of condensing and cogeneration TPP characteristics [12, 28]

Характеристика	Конденсаційна ТЕС	Когенераційна ТЕС
Основна мета роботи	Максимальна генерація електроенергії.	Одночасне виробництво електроенергії та тепла.
Використання тепла	Не використовується для зовнішніх потреб.	Використовується для технологічних і побутових потреб.
Контроль енергетичних потоків	Фокус на ефективність роботи турбоустановок і тепловий баланс конденсатора.	Баланс між електричною потужністю та тепловою віддачею.
Норми якості пари та конденсату	Вміст натрію та кремнієвої кислоти, водневий показник, електропровідність, контроль втрат пари та конденсату.	Враховуються аналогічні параметри, плюс ефективність когенерації за методикою економії первинної енергії.
Норми регулювання та експлуатації	Первинне регулювання частоти струму, температури та вологості повітря, герметичність вакуумних систем.	Аналогічні норми, з додатковим контролем теплової потужності для споживачів.
Джерела та види палива	Стандартні паливні цикли ТЕС.	Усі види палива і технології когенерації, відповідно до правил високо-ефективної когенерації.
Інтеграція цифрових двійників	Використовується для моделювання режимів конденсаційних турбін.	Використовується для моделювання балансу електро- та теплопродуктивності, оптимізації ККД когенераційної установки.

Вибір режиму роботи ТЕС визначає технічні, енергетичні та нормативні вимоги станції та впливає на можливість підвищення ефективності та інтеграції цифрових моделей. Формування енергетичних характеристик конденсаційних ТЕС базується на нормативних документах, що регламентують параметри обладнання, оптимальні режими роботи та контроль за енергетичними потоками. Згідно з ГКД 34.25.503-96 [28], конденсаційні турбіни мають забезпечувати максимальну трансформацію енергії палива в електроенергію, дотриму-

ючись правил конденсації та температурних напорів у конденсаторі. Важливим є контроль герметичності вакуумних систем, чистоти поверхонь конденсатора та витрат охолоджувальної води для підтримки оптимального теплового балансу приміщень. Ці параметри використовуються для розрахунку питомих витрат палива, ККД турбоустановок і загальної ефективності станції.

Нормативи також регламентують хімічний склад і фізичні властивості пари та конденсату: допустимий вміст натрію та кремнієвої кислоти залежить від тиску та типу ТЕС, а водневий показник і електропровідність визначають довговічність обладнання. Втрати пари й конденсату контролюються та не перевищують нормативні значення (для конденсаційних ТЕС – до 1 % від загальної витрати води), що впливає на точність енергетичних розрахунків.

Окрім цього, нормативи охоплюють первинне регулювання частоти струму, температури та вологості повітря у приміщеннях, експлуатацію електроустаткування та вентиляцію приміщень. Ці вимоги формують основу режимних карт енергоблоків і слугують для цифрових двійників, які моделюють роботу ТЕС. Дотримання правил експлуатації забезпечує економічну та надійну роботу турбін у всіх режимах навантаження, що є критично важливим для системного підходу до їх модернізації та підвищення енергоефективності. Для наочності наведено залежність параметрів конденсатора від температури вхідної охолоджувальної води та кількості теплопередавальних трубок у трьох сценаріях роботи (рис. 1, авторська розробка на основі [14]).

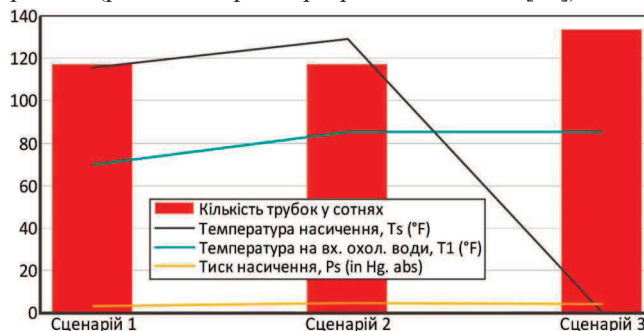


Рис. 1. Теплові характеристики конденсатора за різних сценаріїв роботи / Graph of condenser thermal characteristics under different scenarios of work [14]

Робочі параметри конденсатора конденсаційних ТЕС значно залежать від температури вхідної охолоджувальної води та кількості теплопередавальних трубок. Наприклад, за температури 70 °F і 117,15 сотень трубок тиск насичення становив 3,05 in Hg abs, а підвищення температури води до 85 °F збільшило його до 4,44 in Hg abs. Додавання 10 % трубок знизило тиск до 4,22 in Hg abs, що покращує роботу конденсатора в літні періоди, проте потребує інженерних змін і значних витрат. Ці дані демонструють важливість контролю параметрів води та конфігурації трубок під час складання енергетичних характеристик для забезпечення ефективної та надійної роботи турбоустановок. Інтеграція цифрових двійників дає змогу моделювати різні сценарії роботи, прогнозувати зміни тиску та температури, оптимізувати режими роботи і підвищувати ККД енергоблоків без фізичних втручань.

У когенераційних ТЕС складання енергетичних характеристик передбачає баланс між генерацією електроенергії та тепла для технологічних чи побутових пот-

реб. Для оцінювання ефективності та питомих витрат палива враховують продуктивність турбоустановок і теплообмінного обладнання. З 2024 р. в Україні діють нові правила кваліфікації когенераційних установок на основі європейських директив [12], які встановлюють критерії високоефективної когенерації (економія енергії >10 % для потужностей >1 МВт) і передбачають цифро-

вий формат подання документів. Високоефективні когенераційні установки отримують державну підтримку, що стимулює модернізацію ТЕС та використання цифрових двійників для підвищення енергоефективності та надійності. Схему основних етапів моделювання та розподілу енергії наведено на рис. 2 (авторська розробка на основі [15]).



Рис. 2. Схема складання енергетичних характеристик біомасової когенераційної електростанції для одночасного виробництва електроенергії та технологічного тепла / Scheme for compiling energy characteristics of biomass cogeneration power plants for simultaneous production of electricity and process heat [15]

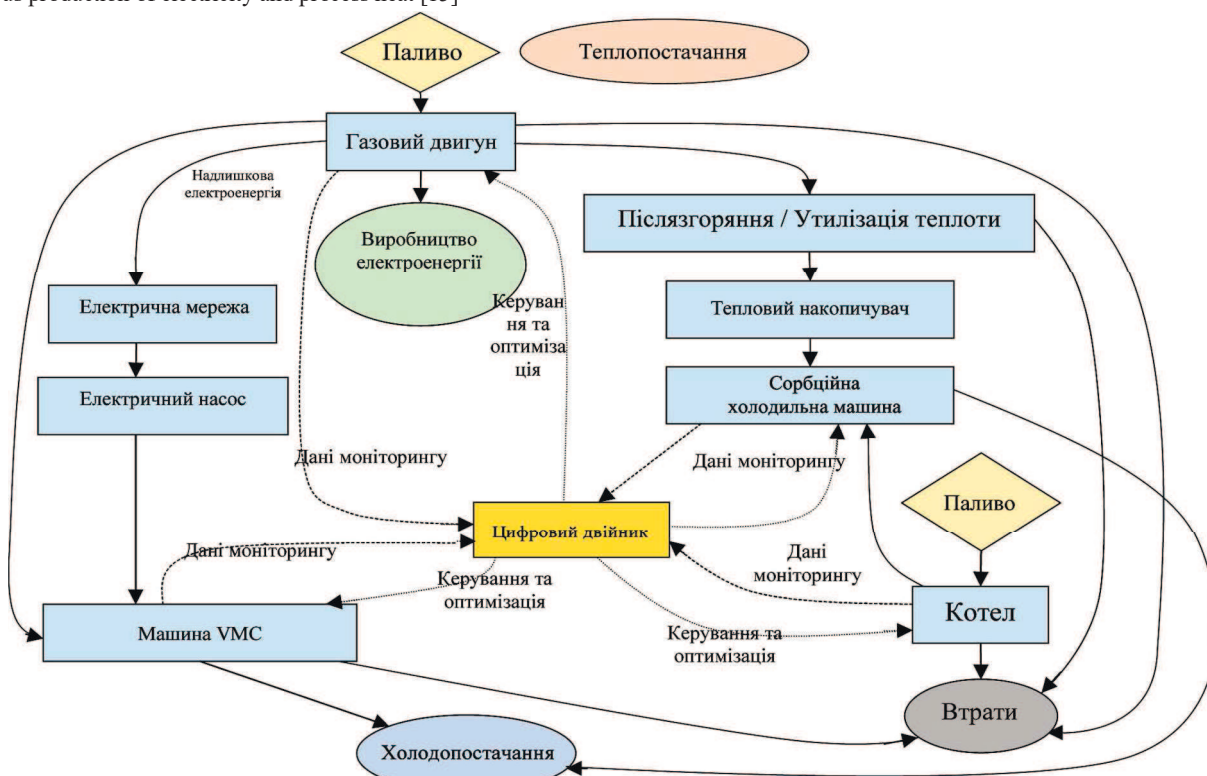


Рис. 3. Схема інтегрованої системи тригенерації ГПУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації режиму роботи / Schematic diagram of an integrated CHP trigeneration system with a digital twin for monitoring and optimisation of operating modes [4]

Схема ілюструє послідовність збирання даних, моделювання когенераційного циклу та розподілу енергії для одночасного виробництва електроенергії та тепла. У цьому режимі оцінюють ефективність роботи турбоустановок, теплообмінного обладнання та питомі витрати палива. Цифрові двійники дають можливість інтегрувати дані, прогнозувати режими навантаження в реальному часі та оптимізувати баланс між електроенергією й теплом, підвищуючи надійність і ККД ТЕС. Ефективність станцій залежить від режиму роботи та контролю енергетичних потоків і параметрів пари і конденсату. Для когенераційних ТЕС ключовий баланс між

електроенергією та теплом, а цифрові двійники забезпечують прогнозування, оптимізацію та підвищення ККД, закладаючи основу для системної модернізації та впровадження ефективних технологій.

Аналіз ефективності добудови додаткового генеруючого обладнання на ТЕС. Сучасна енергетика потребує підвищення ефективності та зниження викидів на ТЕС, де використовують великі обсяги викопного палива. Модернізація через додаткові генераційні установки дає змогу оптимізувати ресурси, зменшити парникові викиди та підвищити ККД виробництва електроенергії та тепла. Інтеграція ГПУ, ГТУ та ММЯР забезпечує

комбіноване виробництво електроенергії і тепла та гнучке управління потоками енергії.

ГПУ у когенераційних схемах виробляють електроенергію та тепло з ККД до 85 % та економією первинної енергії близько 22 % [4]. Відведене тепло охолоджувальних контурів і вихлопних газів можна використовувати для обігріву та кондиціонування, знижуючи енергоспоживання та викиди. На рис. 3 показано тригенераційну систему ГПУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації ключових компонентів (авторська розробка на основі [4]). Схема демонструє потоки енергії від палива до виробництва електроенергії, тепла та холоду, з використанням відведеного тепла через посткомбустайні блоки та сорбційні машини. Цифровий двійник збирає дані з газового двигуна, VMC-машини, сорбційного обладнання та котла для оптимізації роботи та підвищення ефективності.



Рис. 4. Схема інтегрованої ГТУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації режиму роботи / Integrated GTU diagram with digital twin for monitoring and optimisation of operating modes [4]

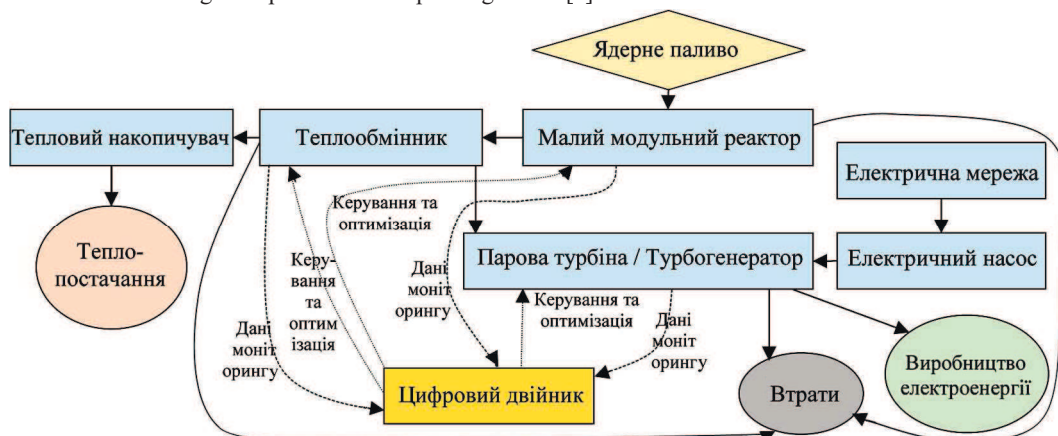


Рис. 5. Схема інтегрованого ММЯР з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації режиму роботи / Integrated SMNR diagram with digital twin for monitoring and optimisation of operating modes [25]

ММЯР – модульні реактори ядерного поділу з компактним активним ядром (<300 МВт електричних) та пасивними системами безпеки [25]. Їх модульна конструкція дає змогу здійснювати збірку на місці експлуатації, що забезпечує розгортання у важкодоступних локаціях. Завдяки високій надійності та інтеграції з цифровими технологіями, ММЯР перспективні для

ГТУ на ТЕС у когенераційних та комбінованих циклах виробляють електроенергію та тепло: повітря стискається турбокомпресором, паливо згорає в камері згоряння, а частина енергії приводить компресор. Відпрацьовані гази передають тепло водяній парі або сорбційним машинам для холодоутворення. Підвищення ефективності досягається завдяки високотемпературним матеріалам, оптимізації термодинамічних циклів й інтеграції з паровими турбінами. На рис. 4 показано інтегровану ГТУ з цифровим двійником для контролю потоків і режимів роботи (авторська розробка на основі [4]). Схема показує потоки енергії від палива до виробництва електроенергії, тепла та холоду, враховуючи відведене тепло ГТУ, парової турбіни та посткомбустайного блока. Цифровий двійник інтегрує дані ключових компонентів для оптимізації роботи та підвищення ефективності системи.

живлення центрів оброблення даних. На рис. 5 проілюстровано інтеграцію ММЯР із цифровим двійником для моніторингу та оптимізації процесу виробництва електроенергії і тепла (авторська розробка на основі [25]). Схема інтегрованої ГТУ демонструє потоки енергії від ядерного палива до виробництва електроенергії та тепла, враховуючи використання відведеного тепла для ко-

генераційних контурів. Цифровий двійник збирає дані з реактора, теплообмінників та турбогенераторів для оптимізації його роботи, підвищення безпеки експлуатації та ефективності функціонування системи.

Інтеграція ММЯР, ГПУ та ГТУ дає змогу створювати гібридні енергетичні комплекси, де кожен компонент виконує специфічну роль: ГПУ забезпечують високий ККД у малопотужних когенераційних схемах; ГТУ оптимізують виробництво електроенергії та тепла у середньо- та великопотужних установках; ММЯР гарантують стабільну генерацію з низьким рівнем викидів.

Табл. 2. Порівняльний аналіз різних типів генераційних установок для модернізації ТЕС / Comparative analysis of different types of generation units for TPP modernisation [9, 13, 31]

Тип установки	Країна	Проект	Основні характеристики
ГПУ	Україна	Децентралізовані газові когенераційні установки	Ефективність використання палива підвищена, економія первинної енергії становить 30-40 %, забезпечується підтримка критичної інфраструктури під час кризових ситуацій.
ГТУ	Румунія	Когенераційна газотурбінна система	Ефективність досягає 100 % на повному навантаженні, зменшуючись до 89,3 % при 75 % та до 69,4 % при 50 %, що вказує на важливість когенерації та комбінованого циклу.
ММЯР	Китай	HTR-PM (High-Temperature Gas-cooled Reactor)	Потужність становить 200 МВт теплової енергії, використовується гелій як охолоджувач, температура пари досягає 523 °C.

Кожен тип генераційного обладнання має власні переваги: ГПУ ефективні у малопотужних когенераційних схемах, ГТУ оптимізують комбіновані цикли середньої потужності, а ММЯР забезпечують стабільне й безпечне виробництво електроенергії та тепла. Системний підхід до модернізації ТЕС передбачає інтеграцію всіх компонентів та моделювання енергетичних потоків через цифрові двійники для оцінювання ефективності й надійності в реальному часі, прогнозування навантажень, оптимізації режиму роботи для відведеного тепла та планування обслуговування без зупинки станції.

Цифрові двійники дають можливість синхронізувати роботу різномірних генераторів, швидко коригувати енергетичні потоки під потреби споживачів та наявність палива, підвищуючи ККД, знижуючи питомі витрати палива й екологічне навантаження. Вони також дають змогу моделювати добудову ГПУ, ГТУ чи ММЯР, оцінювати економічну доцільність їх роботи та прогнозувати економію енергії й зниження атмосферних викидів, що робить підхід стратегічним інструментом розвитку енергетичних комплексів.

Впровадження цифрових двійників пов'язане з ризиками: технологічні збої, некоректні дані від сенсорів, затримки передачі інформації або нестабільні зовнішні умови (перебої палива, екстремальні температури, кібератаки) можуть знижувати точність прогнозів та ефективність роботи. Для мінімізації ризиків потрібні регулярне тестування, резервне копіювання та розроблення сценаріїв реагування на кризові ситуації. Такий підхід забезпечує інтеграцію модернізованого обладнання з цифровим управлінням, підвищуючи ефективність, надійність і екологічність ТЕС.

Обговорення результатів дослідження. Дослідження показує, що використання цифрових двійників у поєднанні з модернізацією генераційного обладнання значно підвищує ефективність та надійність роботи ТЕС, даючи можливість синхронізувати різні типи установок навіть за складних умов. Порівняно з міжнародними роботами, зокрема – дослідженням, отриманим у роботі [21], де розглянуто загальну цифровізацію енергетики, український досвід акцентує увагу на адаптації цифрових двійників до кризових та воєнних умов, що

Сумісна робота цих установок дає змогу ефективно використовувати різні джерела генерування енергії, зменшувати її втрати, знижувати шкідливі викиди та підвищувати загальну електричну і теплову ефективність. Використання цифрових двійників забезпечує балансування виробництва електроенергії, тепла та холоду у реальному часі, що робить комплекс придатним для інтеграції у сучасні інтелектуальні енергетичні мережі. Порівняльний аналіз характеристик кожного типу генераційних установок наведено у табл. 2 (авторська розробка на основі [9, 13, 31]).

демонструє практичну цінність технології для забезпечення стабільності роботи ТЕС.

Конденсаційні ТЕС показують високий ККД турбоустановок за контролю енергетичних потоків та параметрів конденсатора. Результати досліджень, представлені у роботі [17], свідчать про те, що декарбонізація газотурбінних ТЕС за допомогою зеленого водню потребує модернізації та значних інвестицій, проте відкриває шлях до інтеграції відновлюваних джерел і скорочення викидів CO₂. Поточне дослідження доповнює це, приділяючи більше уваги адаптації режимів роботи ТЕС та оптимізації енергетичних потоків за допомогою цифрових двійників, що критично у воєнний час.

Контроль конденсатора та оптимізація теплових і електричних потоків дають можливість підвищити стабільність генерування [22]. Цифрові двійники забезпечують прогнозування тиску й температури, оцінювання впливу навантаження та регулювання роботи енергоблоків без фізичного втручання [16, 29]. Такі моделі дають змогу ТЕС адаптуватися до конкретних ресурсних умов, на відміну від промислових цифрових двійників у ядерних електростанціях, де акцент робиться на створенні комплексних фреймворків для інтелектуального управління.

У контексті енергетичної безпеки України цифрові двійники допомагають оптимізувати баланс електро- та теплопродуктивності когенераційних установок. Когенераційний режим підвищує паливну ефективність, а цифрові моделі дають можливість прогнозувати режими та адаптувати навантаження [24, 26]. Впровадження ГПУ у когенераційні та тригенераційні схеми дає змогу одночасно виробляти електроенергію, тепло та холод, підвищуючи ефективність використання ресурсів і зменшуючи викиди парникових газів на 20-40 % [8].

Цифрові двійники забезпечують системне управління та контроль енергетичних потоків за складних локальних умов [5, 6, 19, 27], даючи можливість підвищити ККД енергоустановок і стабільність енергогенерування. Вони оптимізують роботу газотурбінних та газопоршневих установок, зменшують шкідливі викиди та сприяють раціональному використанню енергоресурсів [27]. Окрім цього, цифрове моделювання підвищує без-

пеку й ефективність ММЯР, враховуючи нормативні та регуляторні вимоги [6].

Загалом, інтеграція цифрових двійників у модернізовані ТЕС дає змогу прогнозувати режимні параметри, оптимізувати енергетичні потоки, підвищувати ККД генераційних установок та одночасно виробляти електроенергію, тепло і холод. Це сприяє зменшенню втрат та скороченню викидів парникових газів, забезпечуючи гнучке, безпечне та ефективне управління сучасними енергетичними комплексами [16, 19, 21, 22, 23, 24, 27].

Проведене обговорення результатів дослідження показало, що хоча у науковій літературі розглядають питання цифровізації енергетики, модернізації теплових електростанцій та використання різних типів генераційного обладнання, комплексний підхід до поєднання цифрових двійників із модернізацією генеруючих установок та оптимізацією режимів роботи ТЕС за умов обмежених ресурсів і кризових зовнішніх факторів висвітлено недостатньо. Це підтверджує доцільність проведення даного дослідження, результати якого доповнюють наявні наукові підходи та розширюють можливості застосування цифрових технологій для підвищення ефективності, надійності та гнучкості роботи сучасних енергетичних систем.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – удосконалено метод підвищення ефективності та надійності роботи теплових електростанцій, який, на відміну від наявних, поєднує цифрові двійники із модернізацією генеруючого обладнання та оптимізацією режимів роботи конденсаційних і когенераційних установок за умов обмежених ресурсів і кризових зовнішніх факторів, що сукупно дає можливість підвищити точність прогнозування енергетичних характеристик, забезпечити адаптивне управління режимами роботи енергоблоків, знизити питомі витрати палива та рівень шкідливих викидів, а також забезпечити експлуатаційну надійність і гнучкість функціонування теплових електростанцій.

Практична значущість результатів дослідження – можна використати для розроблення інженерних рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи теплових електростанцій, інтеграції додаткових генераційних потужностей та застосування цифрових двійників для підвищення ефективності, надійності та стійкості функціонування енергогенеруючих систем.

Висновки / Conclusions

Розроблено системно-інформаційний підхід до створення цифрових двійників енергоустановок задля підвищення ефективності та надійності енергогенерування, що дає змогу оптимізувати режими роботи енергоблоків, прогнозувати їх технічний стан та забезпечити адаптацію до умов динамічних навантажень і складу генеруючих потужностей. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано нормативні документи та енергетичні характеристики теплових електростанцій у конденсаційному та когенераційному режимах навантаження, що дало змогу встановити визначальну роль режиму експлуатації у формуванні ефективності енергоблоків; показано, що для конденсаційних ТЕС ключовими факторами є ефективність роботи турбоустановок і кон-

денсаторів, параметри охолоджувальної води, кількість теплообмінних трубок, герметичність вакуумних систем та якість пари й конденсату.

2. Досліджено вплив експлуатаційних параметрів конденсаційних систем на тепловий баланс енергоблоків та встановлено, що підвищення температури охолоджувальної води від 70 °F до 85 °F призводить до збільшення тиску насичення від 3,05 до 4,44 in Hg abs (понад 45 %), що негативно впливає на ефективність роботи турбінного обладнання.
3. З'ясовано переваги когенераційного режиму роботи теплових електростанцій, який забезпечує одночасне виробництво електричної та теплової енергії та дає змогу економити понад 10 % первинної енергії порівняно з роздільним виробництвом; встановлено, що застосування цифрових двійників сприяє прогнозуванню режимів роботи енергоблоків, оптимізації енергетичних потоків і підвищенню ККД та надійності їх функціонування.
4. Оцінено можливості інтеграції додаткових генеруючих потужностей, зокрема – газопоршневих і газотурбінних установок та малих модульних ядерних реакторів, що створює передумови для підвищення енергоефективності, зменшення питомих витрат палива та скорочення викидів парникових газів; визначено обмеження проведеного дослідження, пов'язані із застосуванням спрощених моделей конденсаційних систем та обмеженою кількістю сценаріїв моделювання, а також окреслено перспективи подальших досліджень, що передбачають використання детальніших термогидравлічних моделей і проведення комплексного техніко-економічного аналізу модернізації ТЕС.

References

1. Al-Mutaz, I., & Aldalbahi, M. S. (2024). Fuel allocation in water and power cogeneration desalination plant. In: Conference: WSTA 15th Gulf Water Conference, Water in the GCC, Doha, Qatar. <https://doi.org/10.5004/dsal.2025.700028>
2. Bhatia, N., Costa, R., Pamela, S. J. P., Davis, A., Gonzalez Beltran, A. N., Gopakumar, V., Zanisi, L., de Witt, S., & Akers, R. (2025). Visualizing Digital Twins of Fusion Power Plants Using Nvidia Omniverse. *AIP Advances*, 15(4), 54–71. <https://doi.org/10.1063/5.0261883>
3. Choi, W., Hudachek, K., Koskey, S., Perullo, C., & Noble, D. (2024). Digital Twin in the Power Generation Industry. *JMST Advances*, 6(4), 103–119. <https://doi.org/10.1007/s42791-024-00065-1>
4. Costea, M., & Feidt, M. (2022). A Review Regarding Combined Heat and Power Production and Extensions: Thermodynamic Modelling and Environmental Impact. *Energies*, 15(23), 124–142. <https://doi.org/10.3390/en15238782>
5. Emenike, O. E., Anyaoha, C., & Okoroigwe, E. C. (2025). Energy Analysis and Optimization of Open Cycle Gas Turbine Power Plant Through Exhaust Heat Recovery. *NIPES Journal of Science and Technology Research*, 7(3), 195–212. <https://doi.org/10.37933/nipes/7.3.2025.1630>
6. Ferreira, N. L. D., Giovedi, C., Modro, M., & Petruzzi, A. (2025). Safety Analysis Reports of First-Of-A-Kind Nuclear Reactors in Brazil: Proposal of Content for Deterministic Safety Analysis. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 12(4B (Suppl.)), 72–89. <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2024.2740>
7. Frolov, O., Bulhakov, R., Kushnareva, G., & Rabochaya, T. (2024). Introduction of Innovative Technologies into Military Garrison Heating Systems to Enhance their Efficiency and Reliability. *Social Development and Security*, 14(2), 44–51. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.2.5>
8. Gonçalves, V., Zabeu, C., Antolini, J., Salvador, R., Almeida, R., Valiati, A. S., & Krieger, G. (2024). Large-Bore HFO Engine Gas Conversion for Power Plants – Part A: Numerical Assessment. Conference: *SAE Brasil 2024 Congress*. <https://doi.org/10.4271/2024-36-0160>

9. Grigore, R., Hazi, A., Banu, I. V., Popa, S. E., & Vernica, S. G. (2024). Enhancing the Energy Performance of a Gas Turbine: Component of a High-Efficiency Cogeneration Plant. *Energies*, 17(19), 58–73. <https://doi.org/10.3390/en17194860>
10. Guan, S., Hu, W., & Zhou, H. (2024). Implementation of Online Digital Twin Framework for Thermal Power Plant. *Proceedings of the 10th International Conference on Energy Engineering and Environmental Engineering*, 187–198. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48204-5_16
11. Jamasali, Y.-D., Turhan, Ş., Hancıoğlu, A., & Kurnaz, A. (2024). Simulation of PM10 and NOx Pollutants at a Coal-Fired Thermal Power Plant Site Using The Gaussian Plume Model in Freemat. *Journal of Polytechnic*, 28(4), 1129–1147. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1430492>
12. Kapustianskyi, A., Romanova, K., Galyanchuk, I., & Yurasova, O. (2026). Revealing the influence of age and fractional composition of woody biomass on the kinetic characteristics of thermal decomposition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8 (139)), 67–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352509>
13. Khodakivskyi, V., Karpenko, D., Bilous, I., & Savickas, R. (2025). Ensuring Energy Security in Ukraine: The Role of Cogeneration and Sustainable Funding for District Heating Systems. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 27, 196–210. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.016>
14. Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., & Romanova, K. (2025). Technological and Engineering Aspects of the Development of Biogas and Biomethane Plants in Ukraine: Prospects for Integration into the Country's Energy System. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 8(1), 801–827. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080134>
15. Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., & Romanova, K. (2022). The heat-transfer system modelling of the convective heating surfaces of a TP-92 steam boiler. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 25(3), 5–20. <https://doi.org/10.33223/epj.152899>
16. Li, L., Ma, H., Wei, M., Zhang, X., Chen, Q., & Xin, Y. (2022). Thermal Power Plant Turbine Rotor Digital Twin Automation Construction and Monitoring System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(2), 194–220. <https://doi.org/10.1155/2022/8527281>
17. Linkevics, O., Grebesa, P., & Andersons, J. (2022). Decarbonisation Options of Existing Thermal Power Plant Burning Natural Gas. *Baltic Carbon Forum* 1. <https://doi.org/10.21595/bcf.2022.22934>
18. Milovanovic, Z. N., Brankovic, D., & Jančić Milovanović, V. (2023). Efficiency of Condensing Thermal Power Plant as a Complex System – An Algorithm for Assessing and Improving Energy Efficiency and Reliability during Operation and Maintenance. *Reliability Modeling in Industry*, 4.0, 233–326. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99204-6.00005-4>
19. Sado, K., Hainey, R., Peralta, J., Downey, A. R. J., & Booth, K. (2023). Digital Twin Model for Predicting the Thermal Profile of Power Cables for Naval Shipboard Power Systems. *Conference: 2023 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, 54–71. <https://doi.org/10.1109/ESTS56571.2023.10220549>
20. Semeraro, C., Aljaghoub, H., Mdallal, A. H. I., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2025). Efficiency and Enhanced Performance: Exploring Digital Twin Implementation in Power Plants. *Renewable and Sustainable Energy Technology*, 1(1), 5. <https://doi.org/10.53941/rset.2025.100005>
21. Shah, B. S. M. I., Ishak, A. J., Hassan, M. K., & Norsahperi, N. M. H. (2024). Energy 4.0: Challenges and Enablers of Digital Twin Application in Power Plant. *Elektrika – Journal of Electrical Engineering*, 23(1), 103–124. <https://doi.org/10.11113/elektrika.v23n1.487>
22. Shrirao, N. M., Sahu, T. T., & Telrandhe, S. (2022). Review on Conservation of Energy in Thermal Power Plant by Using Variable Frequency Drive. *AIP Conference Proceedings*, 2494(1), 239–257. <https://doi.org/10.1063/5.0106481>
23. Škobalj, P., Turanjanin, V., Vučičević, B., Mrđa, D., & Mladenović, M. (2024). Sustainability Assessment of the Energy System Options of A Power Plant through Multi-Criteria Analysis. *STED 2024: XIII International Conference on Social and Technological Development*, pp. 405–412. URL: <https://vinar.vin.bg.ac.rs/handle/123456789/13957>
24. Sui, Q., He, H., Liang, J., Li, Z., & Su, C. (2025). Short-Term Scheduling of Integrated Electric-HydrogenThermal Systems Considering Hydroelectric Power Plant Peaking for Hydrogen Vessel Navigation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2025.3578889>
25. Sun, Y., & Kurosaki, K. (2025). Technical Overview of Recent Developments in Small Modular Reactors in the United States. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.02599>
26. Suyunova, M. B. Q., & Isakhodjayev, K. S. (2025). Cogeneration Power Plants: Working Principle and Efficiency Optimization. *American Journal Of Applied Science And Technology*, 5(6), 120–123. <https://doi.org/10.37547/ajast/Volume05Issue06-26>
27. Thakur, R. (2025). Revamping the Manufacturing Bill of Materials with the Power of Digital Twins. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences*, 13(3), 320–343. <https://doi.org/10.37082/IJRMPS.v13.i3.232443>
28. Varlamov, G. B., Romanova, K. A., Nazarova, I., Daschenko, O., & Kapustiansky, A. (2017). Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes. *Archives of Thermodynamics*, no. 4, 127–137. <https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0028>
29. Xie, J., Fu, Y., Zhang, X., Zhang, H., Hou, J., He, X., Yu, F., & Lin, R. (2022). Application of Industrial Digital Twins in Nuclear Power Plant. *Conference: 2022 29th International Conference on Nuclear Engineering*. <https://doi.org/10.1115/ICONE29-92912>
30. Yu, J., Petersen, N., Liu, P., Li, Z., & Wirsum, M. (2022). Hybrid Modelling and Simulation of Thermal Systems of In-Service Power Plants for Digital Twin Development. *Energy*, 260(22), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125088>
31. Zhang, Z., Dong, Y., Li, F., Huang, X., Zheng, Y., Dong, Z., Zhang, H., Chen, Z., & Li, X. (2024). Loss-of-Cooling Tests to Verify Inherent Safety Feature in the Worlds First HTR-PM Nuclear Power Plant. *Joule*, 8(7), 2146–2159. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.06.014>
32. Zhu, W., & Lu, X. (2024). 3D Digital Modeling Technology for Thermal Power Plant Boilers Based on Digital Twins. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 34(2), 37–44. <https://doi.org/10.1142/S0218126625500586>

A. O. Kapustianskyi¹, M. F. Zayats¹, K. O. Romanova²

¹ Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

A SYSTEM-BASED APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS FOR THERMAL POWER PLANTS TO IMPROVE THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF POWER GENERATION

Modern power systems require higher efficiency and operational reliability of electricity generation while simultaneously reducing primary energy consumption and environmental impacts. This study develops a systems-based approach to the modernization of thermal power plants through the integration of digital twin technology with the upgrading of generating equipment. The study applies system analysis, comparative evaluation, and digital modelling of energy processes to assess the performance of thermal power

plants operating in condensing and cogeneration modes. Moreover, the analysis considers modernization scenarios that include the integration of gas piston units, gas turbine installations, and small modular nuclear reactors into existing energy infrastructures. The results demonstrate that condensing power plants are primarily oriented toward maximizing electricity generation by improving turbine unit performance and optimizing condenser thermal balance. In contrast, cogeneration facilities simultaneously produce electricity and heat while maintaining a balanced energy flow and enabling flexible fuel utilization. Consequently, the study identifies that the operating parameters of condensers strongly depend on the temperature of incoming cooling water and the configuration of heat-exchange tubes, which significantly influences overall plant performance. Moreover, the integration of additional generation technologies improves the efficiency of energy conversion and enhances the flexibility of plant operation. For example, gas piston units provide primary energy savings of approximately 30-40 %, while gas turbine installations achieve the highest efficiency at full load and demonstrate gradual efficiency reduction under partial load conditions. As a result, the incorporation of advanced generation technologies, including small modular nuclear reactors with a thermal capacity of about 200 MW and high-temperature steam parameters, contributes to improved reliability and stability of energy supply. The benefits of this study include the identification of practical solutions for increasing energy efficiency, optimizing energy flows, and reducing emissions in modernized thermal power plants. Consequently, the proposed approach can support engineers and plant operators in implementing advanced digital and technological solutions for improving the performance and sustainability of energy generation systems.

Keywords: regulatory documentation; condensation and cogeneration modes; efficiency; gas piston and gas turbine installations; small modular nuclear reactors.