

SECTION 7. MINING AND OIL AND GAS TECHNOLOGIES

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.AGRO.1.7.1

7.1 Системний підхід до модернізації теплових електростанцій із використанням цифрових двійників у контексті підвищення ефективності та надійності енергогенерації

Сучасні енергетичні системи базуються на використанні різних джерел генерації, серед яких провідну роль відіграють теплові електростанції (ТЕС). Для цього типу генерації характерні значні втрати первинної енергії, обмежена гнучкість режимів роботи та залежність від гарантованих поставок палива. У міжнародній практиці сформувалися підходи до підвищення ефективності та надійності енергопостачання: розвиток когенераційних технологій, застосування газопоршневих установок (ГПУ) і газотурбінних установок (ГТУ) для децентралізованої генерації, а також впровадження цифрових двійників для моніторингу й оптимізації енергетичних процесів. В Україні реалізація подібних рішень ускладнена обмеженістю ресурсів, зношеністю частини генеруючого обладнання та підвищеною вразливістю централізованих систем. В умовах воєнного стану це призводить до особливої потреби у забезпеченні надійності генерації, децентралізації енергопостачання та стійкості критичної інфраструктури. Проблематика дослідження полягає у пошуку технологічних рішень, які здатні інтегрувати міжнародний досвід у національні енергетичні умови та забезпечити ефективність і стабільність роботи ТЕС у кризових обставинах.

Наприклад, автори О. Frolov *et al.* [140] показали, що впровадження інноваційних технологій у системи теплопостачання українських військових містечок дозволяє суттєво підвищити їх ефективність і надійність, зменшити енергетичні витрати та забезпечити стійкість інфраструктури в умовах війни. З іншого боку, результати дослідження С. Semeraro *et al.* [141] узагальнили світовий досвід застосування цифрових двійників у великих енергетичних установках, демонструючи їхню ефективність у моніторингу, прогнозованому

обслуговуванні та діагностиці відмов, але також вказали на наявні прогалини у практичній реалізації цих технологій. Крім того, дослідники W. Zhu *et al.* [142] наголосили, що використання цифрових двійників для керування процесами горіння у ТЕС дозволяє підвищити точність моніторингу, оптимізувати режими роботи та забезпечити прогнозне керування на основі інтеграції з методами штучного інтелекту. Тобто українські рішення орієнтовані на забезпечення надійності та енергоефективності в умовах воєнного стану, тоді як іноземні дослідження зосереджені на довгостроковій цифровій трансформації великих енергетичних систем.

Результати дослідження J. Yu *et al.* [143] засвідчили, що застосування гібридного підходу до моделювання ТЕС із поєднанням фізичних механізмів та експлуатаційних даних дозволяє створити високоточні цифрові двійники для ТЕС, досягаючи середньої похибки моделювання лише 0,79 % у широкому діапазоні режимів роботи. Автори Z. N. Milovanovic *et al.* [144] показали, що підвищення енергоефективності та надійності конденсаційних ТЕС на вугіллі можливе завдяки впровадженню алгоритму заходів, спрямованих на оптимізацію експлуатації та технічного обслуговування, що дозволяє також підвищити їхню гнучкість в умовах переходу до відновлюваної енергетики. Результати I. Al-Mutaz *et al.* [145] показали, що в когенераційних ТЕС можна оптимально розподіляти паливо між виробництвом електроенергії та опрісненням води, що дозволяє підвищити ефективність використання енергоресурсів і точніше планувати витрати палива. В свою чергу, Y.-D. Yamasali *et al.* [146] вказали, що в роботі вугільних ТЕС спостерігається значне перевищення концентрацій забруднюючих речовин над національними стандартами, що вказує на необхідність контролю та оптимізації викидів для зниження негативного впливу на довкілля.

Зі свого боку, S. Guan *et al.* [147] підкреслили, що впровадження уніфікованого онлайн-фреймворку цифрового двійника дозволяє забезпечити синхронізацію параметрів, оптимізацію керування та візуалізацію процесів у теплових енергоблоках. Це підтверджує доцільність застосування цифрових

двійників для підвищення ефективності та надійності експлуатації конденсаційних ТЕС. Результати роботи W. Choi *et al.* [148] продемонстрували, що цифрові двійники в енергетиці дозволяють підвищувати ефективність, надійність і екологічність роботи різних енергетичних систем (газових турбін, вітрових, сонячних та ядерних установок), хоча їхнє практичне застосування все ще супроводжується низкою викликів. Додатково, N. Bhatia *et al.* [149] показали, що використання платформи Nvidia Omniverse для створення цифрових двійників термоядерних електростанцій забезпечує інтеграцію моделювання, візуалізації та реальних даних, що підвищує ефективність проєктування, експлуатації й оптимізації складних енергетичних систем.

У розглянутих роботах відсутній акцент на специфічних умовах воєнного стану та необхідності адаптації енергетичної інфраструктури до кризових викликів. При цьому, у поточному дослідженні основна увага приділена пошуку рішень, що поєднують цифрові двійники з модернізацією генеруючого обладнання, з метою підвищення енергоефективності, надійності та стійкості ТЕС в умовах складних зовнішніх факторів. Завдання дослідження полягали у проведенні аналізу нормативної документації в сфері складання енергетичних характеристик ТЕС (в режимі конденсаційної та когенераційної ТЕС), а також в огляді варіантів добудови (до встановлення) ГПУ, ГТУ та малих модульних ядерних реакторів (ММЯР), включаючи вплив їх сумісної роботи на показники енергетичної ефективності такого комплексу обладнання.

Аналіз нормативної документації щодо енергетичних характеристик ТЕС

В умовах забезпечення енергетичної безпеки України особливе значення набуває підвищення ефективності та надійності роботи ТЕС. Модернізація існуючих ТЕС із застосуванням цифрових двійників дозволяє інтегрувати комплексні підходи до оптимізації роботи обладнання, прогнозування режимів та підвищення ККД генеруючих установок. Одним із ключових аспектів оцінки роботи ТЕС є розгляд режимів її функціонування: конденсаційного та когенераційного.

Для аналізу нормативної документації щодо енергетичних характеристик ТЕС в даній монографії було розглянуто конденсаційний та когенераційний режими. Наведено порівняння їх характеристик за основною метою роботи, використанням тепла, контролем енергетичних потоків, нормами якості пари та конденсату, нормами регулювання та експлуатації, джерелами та видами палива, а також інтеграцією цифрових двійників [150-151]. Крім того, проаналізовано Галузевий керівний документ (ГКД) 34.25.503-96 [150] та нові правила кваліфікації когенераційних установок, що розроблені на основі європейських директив [151].

Конденсаційна ТЕС призначена переважно для генерації електроенергії з максимальною віддачею при охолодженні пари у конденсаторі, що забезпечує високий ККД електричної частини, але не використовує тепло для інших потреб. Натомість когенераційна ТЕС забезпечує одночасну генерацію електроенергії та тепла для технологічних або побутових потреб, що підвищує загальну ефективність використання палива, але вимагає більш складного управління енергетичними потоками та врахування режимів навантаження. Тобто, різниця між конденсаційним і когенераційним режимами ТЕС полягає не лише у цільовому використанні виробленої енергії, а й у комплексі технічних та нормативних вимог до контролю енергетичних потоків, параметрів пари та конденсату, регулювання обладнання та інтеграції цифрових систем моделювання (Табл. 1).

Отже, вибір режиму експлуатації значною мірою визначає технічні, енергетичні та нормативні вимоги до станції, а також впливає на можливості підвищення ефективності та інтеграції цифрових систем моделювання. Складання енергетичних характеристик конденсаційних ТЕС базується на комплексі нормативних вимог, які визначають технічні параметри, оптимальні режими роботи обладнання та контроль за енергетичними потоками.

Таблиця 1. Порівняння характеристик конденсаційних та когенераційних ТЕС

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 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, температури і вологості, герметичність вакуумних систем	Аналогічні норми, з додатковим контролем теплової потужності для споживачів
Джерела та види палива	Стандартні паливні цикли ТЕС	Всі види палива і технології когенерації, відповідно до правил високоефективної когенерації
Інтеграція цифрових двійників	Використовується для моделювання режимів конденсаційних турбін	Використовується для моделювання балансу електро-теплопродуктивності, оптимізації ККД когенераційної

Відповідно до ГКД 34.25.503-96, конденсаційні турбіни та пов'язані з ними установки повинні забезпечувати максимальну ефективність перетворення енергії палива в електричну енергію при дотриманні режимів конденсації та нормативних температурних напорів у конденсаторі [150]. Важливим аспектом є забезпечення герметичності вакуумних систем, контроль за чистотою поверхонь конденсатора та витратами охолоджувальної води для оптимізації теплового балансу енергоблоку. Такі параметри використовуються при розрахунку питомих витрат палива, ККД турбоустановок і загальної ефективності станції.

Нормативні вимоги передбачають також контроль хімічного складу та фізичних властивостей пари і конденсату. Наприклад, допустимий вміст натрію та кремнієвої кислоти у парі котлів регламентується залежно від тиску та типу електростанції, а значення водневого показника і електропровідності забезпечують довговічність та надійність роботи обладнання. Втрати пари та конденсату в межах станції повинні контролюватися і не перевищувати нормативних значень (для конденсаційних електростанцій – до 1 % від загальної

витрати живильної води), що впливає на точність складання енергетичних характеристик та визначення ефективності паливно-енергетичного циклу.

Крім того, нормативи охоплюють вимоги до первинного регулювання частоти, температури та вологості в приміщеннях, експлуатації електроустаткування, вентиляції та запобігання конденсації на важливих вузлах. Всі ці параметри використовуються для формування режимних карт енергоблоків та служать базою для цифрових двійників, що моделюють роботу конденсаційних ТЕС [152]. Зокрема, дотримання встановлених правил експлуатації конденсаційних установок дозволяє забезпечити економічну та надійну роботу турбін у всіх режимах, що є критично важливим при інтеграції системного підходу до модернізації та підвищення енергоефективності станцій. Для наочності наведено залежність робочих параметрів конденсатора від температури вхідної охолоджувальної води та кількості теплопередавальних трубок за трьома сценаріями (Рис. 1).

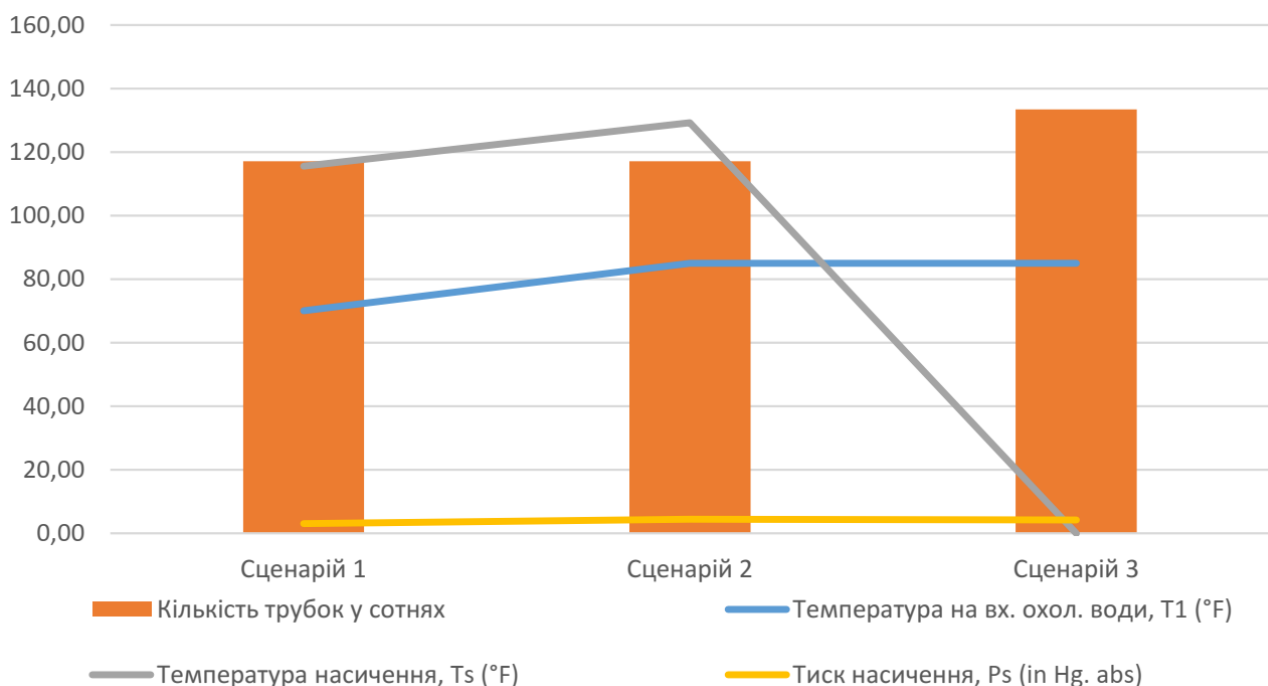


Рисунок 1. Графік теплових характеристик конденсатора за різних сценаріїв

Джерело: створено авторами на основі [152].

Графік підтверджує, що робочі параметри конденсатора суттєво залежать від температури вхідної охолоджувальної води та кількості теплопередавальних трубок. За температури 70 °F і кількості 117,15 сотень трубок (Сценарій 1) тиск насичення становив 3,05 in Hg abs, що відповідає проектним умовам та дозволяє забезпечити оптимальний тепловий баланс енергоблоку. Підвищення температури води до 85 °F при тій же кількості трубок (Сценарій 2) призвело до зростання тиску насичення до 4,44 in Hg abs, хоча зниження електричної потужності блоку не було необхідним. Додавання 10 % трубок (133,39 сотні) за тієї ж температури (Сценарій 3) дозволило зменшити тиск насичення до 4,22 in Hg abs, що покращує роботу конденсатора у спекотні літні дні. Така модифікація може бути технічно ефективною, проте вимагає значних інженерних змін, що знижує її економічну доцільність. Ці результати демонструють важливість контролю температури охолоджувальної води та правильного підбору кількості трубок при складанні енергетичних характеристик конденсаційних ТЕС для забезпечення надійної та ефективної роботи турбоустановок.

Наведений аналіз демонструє, що ефективність роботи конденсатора та загальна енергетична характеристика ТЕС значною мірою залежать від параметрів охолоджувальної води та конфігурації теплопередавальних трубок. У межах системного підходу до модернізації ТЕС перспективним є використання цифрових двійників, які дозволяють моделювати різні експлуатаційні сценарії, прогнозувати зміни тиску і температури та оптимізувати режим роботи турбоустановок. Це створює можливість підвищення ККД і надійності енергоблоків, а також коригувати режимні карти без фізичних втручань у роботу станції. Отже, інтеграція цифрових двійників у процес складання енергетичних характеристик конденсаційних ТЕС може стати ключовим елементом підвищення ефективності та економічності роботи електростанцій.

З іншого боку, в режимі когенераційної ТЕС складання енергетичних характеристик передбачає комплексну оцінку одночасного виробництва електричної та теплової енергії. На відміну від конденсаційного режиму, де основною метою є максимальна генерація електроенергії, когенераційний режим

враховує баланс між віддачею електроенергії та тепла для технологічних або побутових потреб. Для точного визначення енергетичної ефективності та питомих витрат палива необхідно враховувати як електричну продуктивність турбоустановок, так і теплову потужність теплообмінного обладнання, що забезпечує постачання тепла споживачам.

В Україні з 2024 року працюють нові правила кваліфікації когенераційних установок (КГУ) на основі європейських директив [151], які визначають критерії високоефективної когенерації, коли економія електроенергії та тепла порівняно з роздільним виробництвом має перевищувати 10 % для установок потужністю понад 1 МВт (мегават) та бути позитивною для малих установок (від 50 кВт (кіловат) включно до 1 МВт) та мікрокогенераційних установок (потужністю до 50 кВт). Кваліфікація здійснюється на основі проєктних даних та результатів експлуатаційних випробувань, що дозволяє підтвердити відповідність установки стандартам високоефективної когенерації та отримати відповідне свідоцтво.

Складання енергетичних характеристик когенераційних ТЕС також включає облік різних видів палива та технологій когенерації, а нові правила передбачають цифровий формат подання документів, що спрощує адміністрування та контроль. Крім того, високоефективні когенераційні установки отримують державну підтримку у вигляді податкових пільг, що стимулює модернізацію ТЕС та впровадження системного підходу з використанням цифрових двійників для підвищення енергоефективності та надійності енергогенерації [153]. Для наочного представлення процесу складання енергетичних характеристик когенераційної ТЕС наведено схему основних етапів моделювання та розподілу енергії (Рис. 2).

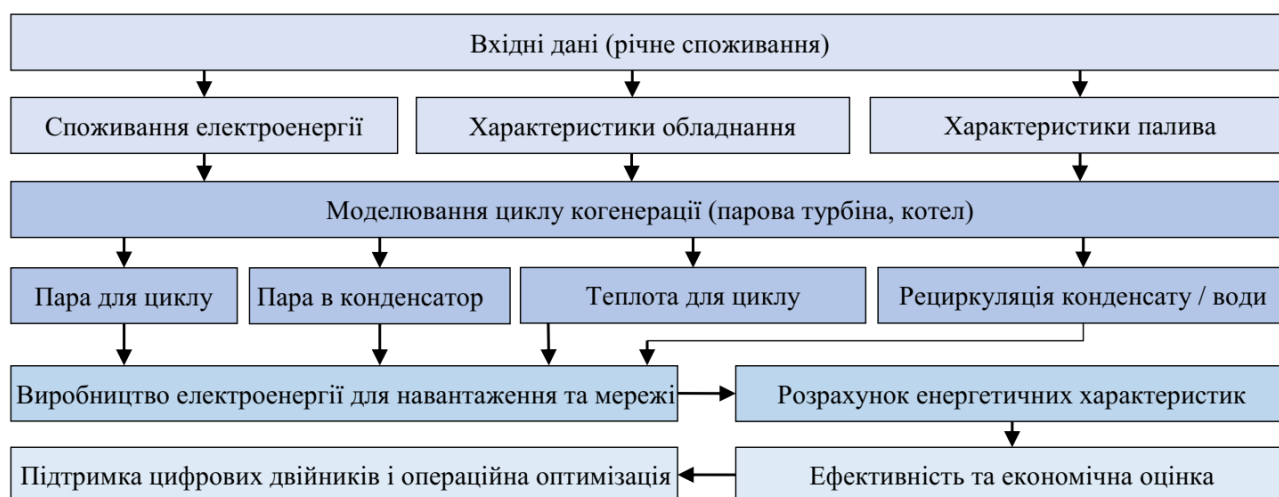


Рисунок 2. Схема енергетичних характеристик біомасової когенераційної електростанції для одночасного виробництва електроенергії та тепlopостачання

Джерело: створено авторами на основі [153].

Ця схема демонструє послідовність збору даних, моделювання когенераційного циклу, розподілу енергії та оцінки ефективності для одночасного виробництва електроенергії та тепла. Отже, складання енергетичних характеристик ТЕС у когенераційному режимі передбачає комплексну оцінку одночасного виробництва електроенергії та тепла з урахуванням ефективності турбоустановок, теплообмінного обладнання та питомих витрат палива. Використання цифрових двійників може дозволити інтегрувати дані з різних джерел, моделювати режим роботи в реальному часі та оптимізувати баланс між виробництвом електроенергії та тепла, підвищуючи ефективність і надійність енергогенерації та сприяючи модернізації ТЕС і КГУ.

Таким чином, ефективне функціонування станцій залежить від режиму роботи (конденсаційного чи когенераційного) та від точного контролю енергетичних потоків, параметрів пари і конденсату. Вибір режиму визначає технічні та експлуатаційні вимоги, впливає на ККД і оптимізацію використання палива. Для когенераційних ТЕС ключовим є баланс між виробництвом електроенергії та тепла для технологічних потреб, а інтеграція цифрових двійників може забезпечити прогнозування режимів, оптимізацію роботи обладнання та підвищення надійності й ефективності енергогенерації. Загалом,

нормативна база створює основу для системного підходу до модернізації ТЕС та впровадження високоефективних технологій.

Аналіз ефективності добудови додаткового генеруючого обладнання на ТЕС

Сучасна енергетика стикається з необхідністю підвищення ефективності та екологічності виробництва електроенергії, особливо на ТЕС, де традиційно споживаються великі обсяги викопного палива. Різні варіанти добудови додаткового генеруючого обладнання на ТЕС дозволяють оптимізувати використання первинних енергоресурсів, зменшити викиди парникових газів та підвищити загальну ефективність виробництва електроенергії та тепла. Серед підходів до модернізації ТЕС слід виділити інтеграцію газопоршневих та газотурбінних установок, а також застосування ММЯР, що дозволяє комбінувати виробництво електроенергії з різними формами корисного тепла та забезпечувати більш гнучке управління енергетичними потоками.

Наприклад, ГПУ, зокрема в когенераційних конфігураціях, дозволяють одночасно виробляти електроенергію та теплову енергію, використовуючи природний газ або біогаз як паливо. Їхні ключові переваги включають високий ККД (до 85 %), можливість економії первинної енергії близько 22 % порівняно з роздільним виробництвом електроенергії та тепла, а також зниження викидів вуглекислого газу, приблизно на 20-40 % залежно від виду палива [154]. Результати демонструють ефективне використання відведеного тепла з охолоджувальних контурів двигуна та вихлопних газів для обігріву води та кондиціонування, що дозволяє досягати додаткової економії енергії та скорочення викидів шкідливих речовин. Рисунок 3 показує інтегровану систему тригенерації ГПУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації роботи ключових компонентів.

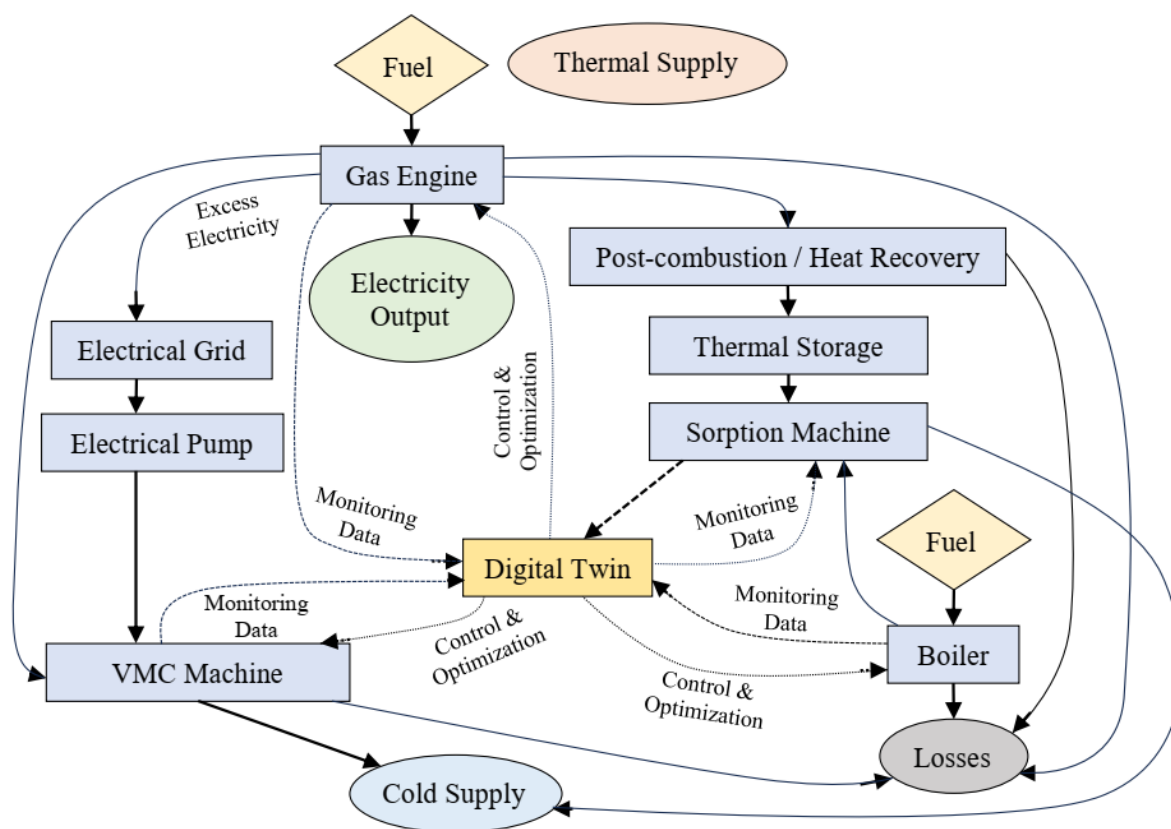


Рисунок 3. Схема інтегрованої системи тригенерації ГПУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації

Джерело: створено авторами на основі [154].

Надана схема показує основні енергетичні потоки від джерел палива до виробництва електроенергії, тепла та холоду, включаючи використання відведеного тепла через блоки посткомбустації та сорбційної машини. Цифровий двійник збирає дані з газового двигуна, VMC-машини (Vapor Mechanical Compression), сорбційної машини та котла для оптимізації управління та підвищення загальної ефективності системи. В свою чергу, ГТУ на ТЕС, особливо в когенераційних та комбінованих циклах, забезпечують ефективне виробництво електроенергії та тепла шляхом стиснення повітря в турбокомпресорі та спалювання природного газу або рідкого палива в камері згоряння. Частина механічної енергії турбіни використовується для приводу компресора, а відпрацьовані гази можуть передавати тепло водяній парі для промислового використання або подаватися у сорбційні машини для холодоутворення [154]. Підвищення електричної ефективності досягається за

рахунок використання високотемпературних турбінних матеріалів, оптимізації термодинамічних циклів та інтеграції з паровими турбінами у комбінованих циклах. Рисунок 4 демонструє схему інтегрованої ГТУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації енергопотоків та управління режимами роботи.

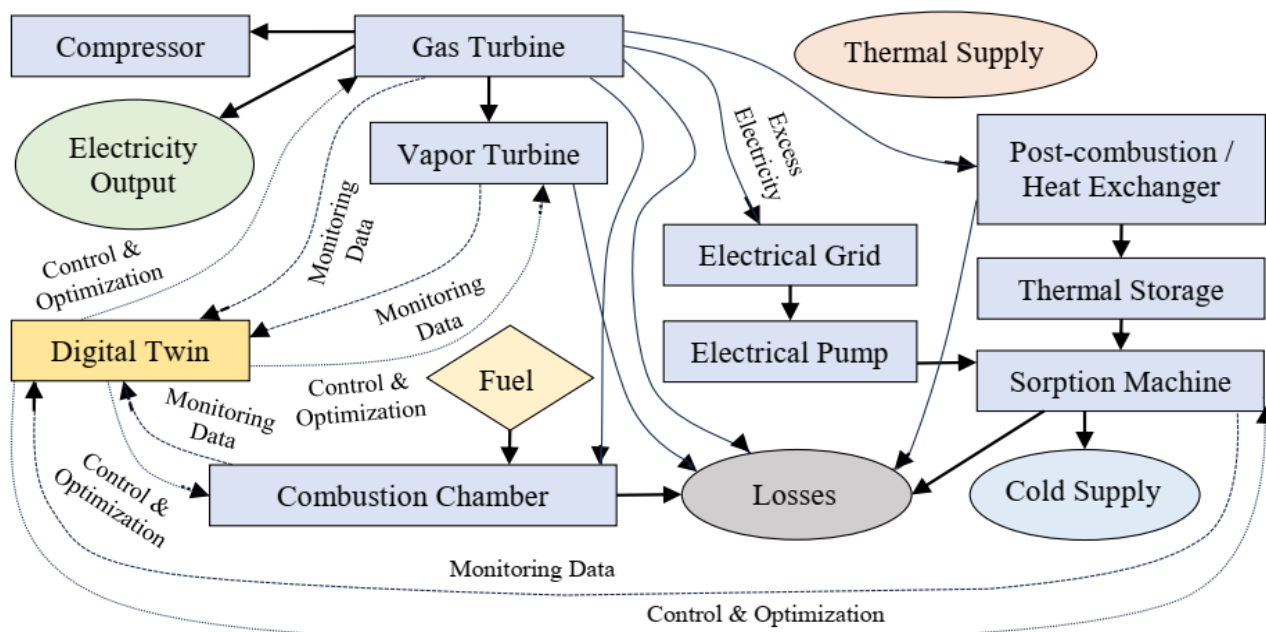


Рисунок 4. Схема інтегрованої ГТУ з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації

Джерело: створено авторами на основі [154].

Ця схема ілюструє основні енергетичні потоки від палива до виробництва електроенергії, тепла та холоду, включаючи відведене тепло ГТУ, парової турбіни та посткомбустайного блока. Цифровий двійник збирає дані з ключових компонентів і забезпечує їхнє оптимальне управління для підвищення ефективності та надійності роботи системи. Зі свого боку, ММЯР – це клас передових реакторів ядерного поділу, що характеризуються компактним активним ядром (зазвичай <300 МВт електричних) та пасивними системами безпеки [155]. Модульна конструкція дозволяє збирати їх безпосередньо на місці експлуатації, що робить можливим розгортання у важкодоступних для традиційних великих реакторів локаціях. Рисунок 5 демонструє схему

інтегрованого ММЯР з цифровим двійником для моніторингу, управління та оптимізації виробництва електроенергії та тепла.

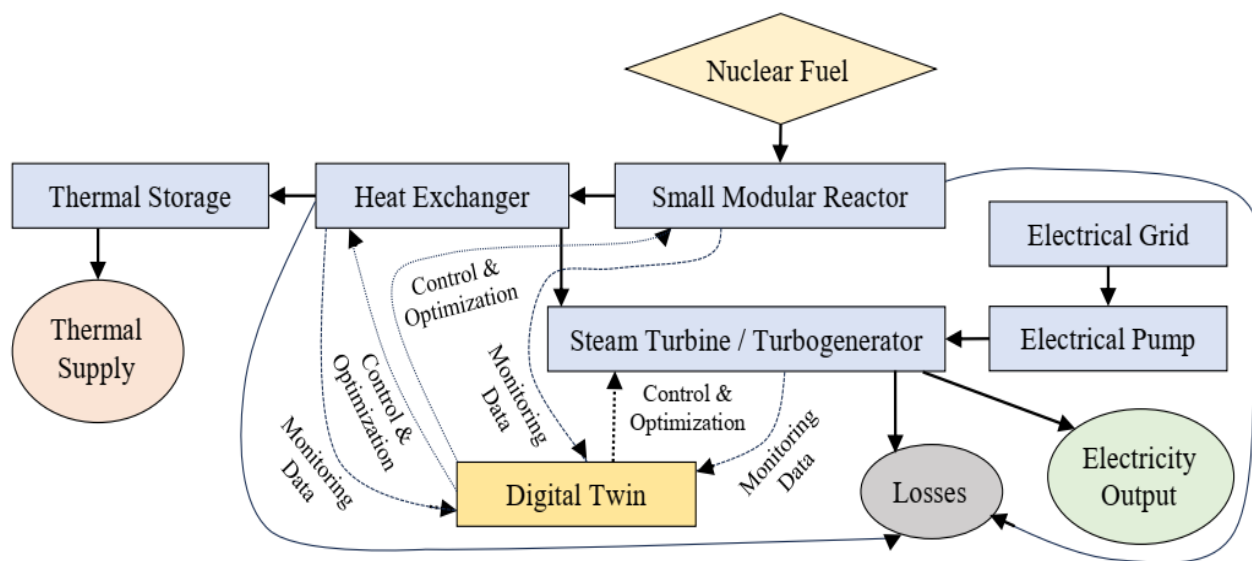


Рисунок 5. Схема інтегрованого ММЯР з цифровим двійником для моніторингу та оптимізації

Джерело: створено авторами на основі [155].

Схема ілюструє ключові потоки енергії від ядерного палива до виробництва електроенергії та тепла, включаючи відведене тепло реактора для теплових контурів та систем когенерації. Цифровий двійник збирає дані з реактора, теплообмінників та турбогенераторів для оптимізації роботи системи, підвищення безпеки та ефективності енергогенерації. Інтеграція ММЯР з іншими генераційними установками, такими як ГПУ та ГТУ, дозволить створювати комплексні енергетичні системи, які поєднують переваги кожного компонента і забезпечують більш ефективне використання енергоресурсів.

Кожен з цих компонентів виконує специфічну роль: ГПУ забезпечують високий ККД у малопотужних когенераційних схемах та ефективне використання відведеного тепла; ГТУ оптимізують виробництво електроенергії та тепла у середньо- та великопотужних установках завдяки когенераційним і комбінованим циклам; ММЯР [156] забезпечують стабільне виробництво електроенергії та тепла з низьким рівнем викидів, підвищуючи безпеку та

надійність енергопостачання. Сумісна робота цих трьох типів установок у складі одного комплексу дозволяє максимально ефективно використовувати первинні енергоресурси: відновлювані або викопні види палива, ядерне паливо та відведене тепло, зменшувати втрати енергії, знижувати викиди парникових газів і шкідливих речовин, а також підвищувати загальну електричну та теплову ефективність системи [157]. При цьому, використання цифрових двійників для моніторингу та оптимізації роботи всіх компонентів дозволяє оперативно регулювати енергетичні потоки та балансувати виробництво електроенергії, тепла і холоду відповідно до поточних потреб. Для наочної оцінки характеристик і переваг кожного типу установок наведено порівняльний аналіз (Табл. 2).

Таблиця 2. Порівняльний аналіз різних типів генераційних установок для модернізації ТЕС

Тип установки	Країна	Проект	Основні характеристики
ГПУ	Україна	Децентралізовані газові когенераційні установки	Ефективність використання палива підвищена, економія первинної енергії складає 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 підкреслює важливість когенерації та комбінованого циклу
ММЯР	Китай	HTR-PM (High-Temperature Gas-cooled Reactor)	Потужність складає 200 МВт теплової енергії, використовується гелій як охолоджувач, температура пари досягає 523 °C

Тобто, кожен тип установки вирізняється власними перевагами: ГПУ забезпечують високу ефективність у малопотужних когенераційних схемах, ГТУ демонструють оптимальну ефективність у комбінованих циклах середньої потужності, а ММЯР гарантують безпечне та стабільне виробництво тепла й електроенергії на комерційній основі [158]. Загалом, системний підхід до

модернізації ТЕС передбачає комплексне планування і взаємодію всіх компонентів енергетичного комплексу на рівні процесів та даних. Основою такого підходу є моделювання всіх енергетичних потоків за допомогою цифрових двійників, що дозволяє оцінювати ефективність і надійність роботи обладнання в режимі реального часу. Це включає прогнозування навантажень, аналіз режимів роботи різних генераторів, оптимізацію використання відведеного тепла та планування технічного обслуговування без зупинки виробництва. При цьому, важливою складовою є координація роботи різнорідних генераційних установок у складі одного комплексу, адже газопоршневі та газотурбінні установки забезпечують гнучку регульовану генерацію, а ММЯР додають стабільність базового навантаження. Цифровий двійник дозволяє інтегрувати дані з усіх типів генераторів, синхронізувати їх роботу та швидко коригувати енергетичні потоки у відповідь на зміни попиту або наявності палива. Це забезпечує не тільки підвищення ККД комплексу, а й значне зниження питомих витрат палива та екологічного навантаження.

Додатковим аспектом є можливість адаптивного планування розвитку та модернізації ТЕС. На основі даних цифрових двійників можна моделювати сценарії добудови нового обладнання, оцінювати економічну доцільність установки додаткових ГПУ, ГТУ чи ММЯР, визначати співвідношення потужностей і прогнозувати очікувану економію енергії та зниження викидів.

Щодо впровадження цифрових двійників у реальну експлуатацію ТЕС, то попри численні переваги, воно пов'язане з потенційними ризиками, які можуть вплинути на ефективність і надійність енергетичних комплексів. Одним із ключових ризиків є технологічні несправності, такі як збої в роботі програмного забезпечення цифрових двійників, помилки в інтеграції даних із датчиків або некоректна обробка великих обсягів інформації в реальному часі, що може призвести до неточних прогнозів режимів роботи або неправильного керування обладнанням. Наприклад, невідповідність даних із фізичних систем (ГПУ, ГТУ, ММЯР) і цифрових моделей через несправність сенсорів чи затримки в передачі

даних може спричинити помилки в оптимізації енергетичних потоків, знижуючи ККД або навіть викликаючи аварійні ситуації.

Іншим важливим аспектом є вплив нестабільних зовнішніх умов, які не завжди враховуються в моделюванні, таких як перебої в постачанні палива, зміна кліматичних умов (наприклад, екстремальні температури, що впливають на охолоджувальну воду), або кібератаки на цифрові системи, що є особливо актуальним в умовах воєнного стану. Ці фактори можуть порушити синхронізацію цифрового двійника з реальними процесами, ускладнюючи прогнозування та адаптивне керування, а також підвищуючи ризик економічних втрат через зупинку обладнання чи неоптимальну експлуатацію [159]. Для мінімізації ризиків необхідні регулярне тестування цифрових систем, резервне копіювання даних і розробка сценаріїв реагування на кризові ситуації. Таким чином, розглянутий підхід дозволяє створювати інтелектуальні та ефективні енергетичні комплекси, які інтегрують модернізоване обладнання і цифрові технології управління, забезпечуючи високий рівень енергоефективності, надійності та екологічності виробництва електроенергії та тепла.

Підсумовуючи, отримані результати показали, що інтеграція цифрових двійників у модернізовані ТЕС дозволяє ефективно прогнозувати режимні параметри, оптимізувати енергетичні потоки та підвищувати ККД генераційного обладнання в складних ресурсних умовах. Застосування когенераційних і конденсаційних схем, а також комплексне використання ГПУ, ГТУ та ММЯР, забезпечує одночасне виробництво електроенергії, тепла та холоду при зменшенні втрат і зниженні викидів парникових газів. Таким чином, цифрові двійники виступають ключовим інструментом підвищення надійності, безпеки та екологічної ефективності сучасних ТЕС, забезпечуючи гнучке та інтегроване управління енергетичними потоками.