

Лазуренко Костянтин Олександрович, аспірант кафедри електричних машин, +38(050)610-12-98, kostyan22@gmail.com, ORCID ID:0009-0003-1134-2233

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

Шевченко Валентина Володимирівна, професор кафедри електричних машин, +38(067)407-84-55, Valentyna.Shevchenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9557-9849

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОНЛАЙН-ДІАГНОСТИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ НА ТЕС З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

***Анотація** У статті розглядаються перспективи застосування цифрової on-line діагностики турбогенераторів з використанням систем штучного інтелекту для суттєвого підвищення надійності, ефективності ремонтів та оперативного контролю працездатності, зменшення кількості аварійних зупинок і продовження строку роботи турбогенераторів теплових електричних станцій. Досліджуються основні практичні аспекти передачі контролюючих та управляючих функцій від оператора системі on-line аналітики на основі використання штучного інтелекту зі значним збільшення контролюючих фізичних параметрів турбогенераторів та можливістю створенням моделей типу «цифровий двійник».*

***Ключові слова:** турбогенератор, цифровізація, моніторинг генеруючого електрообладнання, on-line діагностика, діагностичний параметр, датчик, системи штучного інтелекту, передача функцій в систему on-line діагностики, схема діагностики та моніторингу, цифровий двійник*

Lazurenko Kostyantyn, PhD student, Department of Electrical Machines, ORCID ID:0009-0003-1134-2233, +38(050) 610-12-98, kostyan22@gmail.com

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

Shevchenko Valentyna, Professor, Department of Electrical Machines, +38(067)407-84-55, Valentyna.Shevchenko@khpi.edu.ua, ORCID ID:0000-0002-9557-9849

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Kyrpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002*

IMPLEMENTATION OF AUTOMATED ONLINE DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR TURBOGENERATORS AT THERMAL POWER PLANTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

***Abstract:** The article examines the prospects of applying digital online diagnostics for turbogenerators using artificial intelligence systems to significantly improve reliability, repair efficiency, and operational performance monitoring, as well as to reduce the number of emergency shutdowns and extend the service life of turbogenerators at thermal power plants. The study investigates the main practical aspects of transferring control and management functions from the operator to an AI-based*

online analytics system, involving a significant increase in the number of monitored physical parameters of turbogenerators and the possibility of creating "Digital Twin" models.

Keywords: *turbogenerator, digitalization, generating electrical equipment monitoring, online diagnostics, diagnostic parameter, sensor, artificial intelligence systems, transfer of functions to online diagnostics system, diagnostic and monitoring scheme, digital twin.*

Вступ: Через енергетичну кризу, фінансові проблеми, війни у всіх промислово-розвинених країнах світу відсутня можливість своєчасного оновлення електрообладнання (ЕО) енергетичних об'єктів. В той же час, безперервне зростання попиту на електроенергію вимагає постійного збільшення її виробництва, забезпечення національної енергетичної незалежності кожної країни, що наразі визначає і політичну незалежність та й безпеку. До 2022 року Україна мала середнє-світовий показник питомого енергозабезпечення (1,2-1,4 кВт/людину), але наша енергосистема вже на той час мала значний технічний знос і фахівці відмічали відсутність достатніх інвестицій в об'єкти нової генерації. Станом на 2023–2024 р.р. показник питомого енергозабезпечення знизився орієнтовно до 0,8–1,0 кВт/людину, [1–4]. І стан погіршується: в листопаді 2025 р. Міненерго країни зазначило, що всі великі ТЕС і ГЕС України пошкоджені агресором за час війни [5].

Існують різні програми щодо шляхів забезпечення працездатності енергосистеми України і подальшого її відновлення [6-8]:

1) відновлення зруйнованих ТЕС та ГЕС; побудова нових, сучасних, джерел електроенергії: блоків великих та малих АЕС, міні-ТЕС та міні-ГЕС, когенераційних установок, мобільних ТЕЦ, тощо;

2) використання енергозберігаючих технологій на всіх етапах генерації, розподілу та передачі електроенергії до споживачів; підвищення якості приладів обліку енергоспоживання, автоматизація процесів вимірювання і розрахунків;

3) з метою підвищення захисту енергетичної системи країни та надійності перехід від загальної централізованої енергомережі до розподілених (децентралізованих) мереж з внутрішніми джерелами власної генерації.

Це перспективний, необхідний, але довгий і складний шлях, який необхідний для забезпечення енергетичної незалежності України в майбутньому. Але

електроенергія потрібна сьогодні, тому головною задачею виживання країни є збереження і підтримка в робочому стані встановленого на електростанціях ЕО.

В умовах війни, через руйнування енергетичних об'єктів і мереж, з врахуванням переходу до концепції "Індустрія 4.0", яка передбачає цифровізацію, автоматизацію та використання можливостей штучного інтелекту (ШІ), трансформується значення і ролі різних джерел енергії. Так ТЕС тепер не тільки забезпечують базову (близько 30–40 %) генерацію електроенергії, але й залишаючись головними, високоманевровими джерелами резервної генерації, практично основними джерелами регулювання балансу активної та реактивної потужності в мережі [6, 8]. До кінця війни наявні ТЕС працюватимуть у аварійному режимі, з упором на надійність та живучість, а не на інновації. Можливе впровадження сучасних технологій отримання електроенергії, але без виведення генераторів з роботи на електростанціях. Це унікальний досвід для майбутніх досліджень національного переходу до концепції "Індустрія 4.0", яка передбачає впровадження і розвиток систем моніторингу та прогнозної аналітики для оптимізації роботи ТЕС: цифровізація, автоматизація та інтернет речей (IoT), прогнозування майбутньої поведінки об'єктів з метою прийняття оптимальних рішень [1, 2, 6, 9–14].

Метою роботи є визначення об'ємів і типів робіт, які можна від людини-оператора передати аналітичним модулям ШІ, запропонувати обмеження і зміну ролі людини-оператора в системі діагностики ТГ на електростанції з використанням системи ШІ.

Основна частина.

Турбогенератори (ТГ) ТЕС України в більшості працюють на 15-20 років більше встановленого заводом-виробником строку. Відмова від планово-попереджувальних ремонтів, значний знос, постійна робота в перехідних, неномінальних режимах додатково негативно впливає на їх надійність і потребує постійного онлайн контролю параметрів. Тому своєчасним та актуальним є впровадження платформ ШІ та розумних мереж для забезпечення автоматичного регулювання і вибору режимів роботи, для підвищення ККД і в тому числі, для

розроблення оптимальної структури діагностики ТГ з точки зору забезпечення їх надійності, [8, 9, 15, 16].

Своєчасне виявлення дефектів за допомогою додатково встановлених датчиків онлайн-контролю дозволяє попереджувати аварії та позапланові зупинки, подовжує строки експлуатації ТГ, забезпечує безперервну та надійну роботу всієї енергосистеми. Але встановлення додатково необхідної кількості датчиків різних діагностичних параметрів (датчики вібрації та контролю стану ізоляції, теплові датчики, датчики акустичного, ультразвукового та інфрачервоного контролю) неможливе, бо це обмежується «людським фактором» – через інформаційне перевантаження операторів виникає високий ризик помилок, що підтверджується статистикою аварійних випадків, [8, 15, 17].

Навіть у мирні часи психологи визначали проблемне коло професійно-важливих якостей, які мають найбільший вплив на ефективність професійної діяльності операторів електростанцій: швидкість переробки інформації та адекватність прийняття рішень у складних ситуаціях, в умовах перешкод; стійкість до стресу та до монотонної роботи, точність сприйняття інформації в складних умовах; розсіяння уваги на різні показники; фізична витривалість; професійна відповідальність і спрямованість. Війна поглибила ці проблеми [8]. Для підвищення якості контролю стану ТГ людиною-оператором необхідно обмежувати кількість датчиків, встановлювати лише необхідні, найбільш інформативні, оскільки збільшення каналів контролю перевантажує людину, підвищує ризик своєчасного виявленням дефектів, що приведуть до аварійної зупинки. Впровадження додаткових датчиків онлайн-контролю стану ТГ знижує вірогідність аварійних відмов, але це можливе тільки при зниженні залежності від «людського фактору» шляхом втілення автоматизованих систем контролю, збору та аналізу онлайн даних [18].

На рис. 1 зображена існуюча схема проведення моніторингу та діагностики ТГ на електростанціях. Як видно з цієї схеми, оператору доводиться працювати з великим об'ємом даних. Це знижує ефективність його контролю через велике психологічне навантаження. Для контролю застосовують аналогові або

квазіцифрові системи. Дані датчиків передаються на пульт, де оператор з ними працює, аналізує параметри (частоту, напругу, потужність, тиск, вібрацію, температуру тощо) і намагається вчасно виявити відхилення, [19-22]. У разі появи аномалій саме він приймає рішення про зниження навантаження, інтенсифікацію охолодження або навіть про аварійне зупинення ТГ, щоб запобігти аварії.

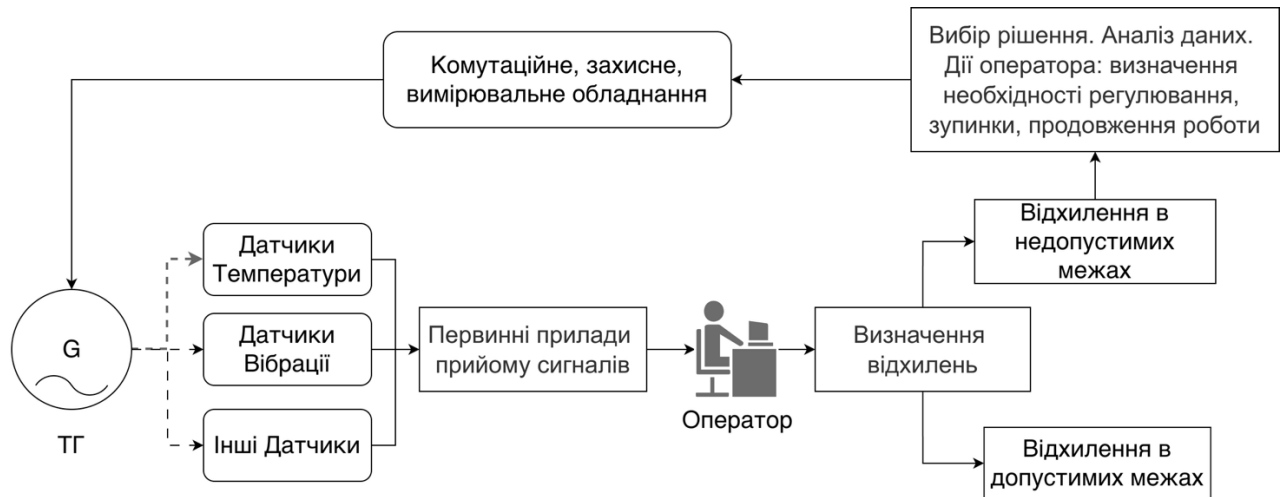


Рисунок 1 – Схема моніторингу та діагностики ТГ в режимі ручного керування оператором

Ще на заводі-виробнику в ТГ закладають багато контрольних датчиків, що входять у стандартну систему моніторингу його стану. Їх кількість і тип залежать від серії (наприклад, ТГВ-200-2УЗ, ТГВ-300-2УЗ, ТВВ-1000-4УЗ тощо), але в цілому вони подібні для всіх ТГ. Встановлення системи датчиків на заводі-виробнику – це невід’ємна частина конструкції сучасного ТГ, яка забезпечує захист та достатню діагностику обладнання. Наприклад, забезпечують автоматичну зупинку обладнання або зниження навантаження при небезпечних відхиленнях температури, забезпечують оцінку стану ізоляції, рівномірність навантаження та ефективність системи охолодження, дозволяють обирати оптимальний режим роботи [22–24].

Тепловий стан є важливішим показником, тому в ТГ встановлена найбільша кількість датчиків термічного контролю. В табл. 1 наведений перелік датчиків контролю температури заводської комплектації, в табл. 2 наведений загальний перелік встановлених датчиків контролю стану ТГ.

Можна визначити, що ще на заводі-виробнику встановлюється багато датчиків, що передають людині-оператору інформацію щодо стану ТГ з частотою від 5 разів за хвилину до 1 разу на годину. При появі значних відхилень частоту зчитування збільшують до 1 сек. Значення, що визначають необхідність такого прискорення, підбирають у залежності від конструкції, типу та місця встановлення датчика [6, 15, 25]. Наприклад, при зміні температури підшипників ТГ можливі перші попередження при перевищенні норми на $+(8-10)^\circ\text{C}$, а при $+20^\circ\text{C}$ визначається аварійний стан і необхідність зупинки всього турбоагрегату.

Таблиця 1 – Місця встановлення, кількість і призначення термо-датчиків контролю стану ТГ заводської комплектації серії ТГВ (ТГВ-200-2УЗ, ТГВ-300-2УЗ), виробництва заводу «Електроважмаш», м. Харків, Україна

Місце встановлення	Кількість і тип датчиків	Призначення
Між стрижнями та витками обмотки статора в кожній фазі	6-12 датчиків на ТГ (по 2–4 на фазу), мінімум 6. Ще 1–3 окремі датчики: на секцію, резервний та контрольний. Найчастіше це платинові термоопори Pt-100 або Pt-1000, інколи термопари для швидкої динаміки	Контроль теплового стану обмоток, контроль локальних перегрівів, контроль ізоляції, що є основним критерієм швидкості теплового старіння та допустимості перевантажень. Встановлюється в найбільш нагрітому місці обмотки, яке визначається під час розрахунку і залежить від конструкції.
Контроль температури осердя статора.	6-12 датчиків Pt-100 уздовж довжини осердя у закладних отворах по радіусу та по довжині, в каналах радіальної вентиляції; між пакетами ближче до торців та в центральній частині	Контроль нагріву та виявлення зон локальних перегрівів осердя від формування вихрових струмів, від локальних порушень ізоляції тощо.
Контроль температури виводів обмотки статора та генераторних шин	3-6 термоопорів Pt-100 або термопар: мінімум одна на кожну фазну клему, додатково – на муфтах; у місцях підключення до струмопровідних шин.	Контроль температури і попередження перегріву через погіршення контактних з'єднань шинопроводів та виводів обмотки статора ТГ, на місцях затисків, у вивідних клемах та в муфтах.
Контроль температури підшипників – в залежності від конструкції (опорні та упорні)	Практично завжди термоопори Pt-100, Pt-1000. По 2–4 датчики на кожну вальницю на вході /виході оливи та на вкладиші підшипника	Контроль температури вкладок, «оливної ванни», оливи на подачі та при виході. Перегрів означає можливу втрату центрування ротора. Перевірка герметичності і працездатності ущільнень в місцях виходу валу
Контроль температури в системі охолодження, в	Датчики Pt-100 та Pt-1000. Для водню – по одному датчику на кожен потік; для повітря – після охолоджувача; для води – на	Контроль температури водню/повітря на вході в машину та на виході з корпусу, води – в теплообмінниках. Для ТГ з водяним охолодженням стрижнів

Місце встановлення	Кількість і тип датчиків	Призначення
залежності від охолоджуючого середовища: водень, повітря, вода	вході і виході кожної секції обмотки статора	обмотки статора встановлюють датчики температури води на вході/виході кожної секції та датчики тиску і витрат води для перевірки герметичності стрижнів обмоток
Контроль температури оливної системи і системи змащення	Датчики температури оливи в баку, перед фільтрами та після них, на вході в підшипники, в відведенні з ТГ	Використовуються для контролю нагріву підшипників і оливи, для забезпечення цілісності оливної плівки, що забезпечує «спливання» ротора на 0,3 мм
Контроль температури корпусу і кінцевих (захисних) щитів	4–8 температурних датчиків Pt-100 встановлюють на корпусі, на опорних площинах, кришках, торцях, в зонах підвищених механічних напружень	Для оцінки теплового стану всієї машини, для загального теплового моніторингу корпусу, виявлення перегрівів вальниць і корпусних виводів. Не менш 3 датчиків розподіляють уздовж активної частини статора, щоб визначати градієнт температури. Додатково встановлюють 4-8 термопар типу K (хромель-алюмель) або S (платино-родій-платина) для швидкого реагування на появу швидких імпульсних перегрівів від часткових розрядів та від появи дуги.

Таблиця 2 – Основні вузли ТГ та датчики, що встановлюють для контролю стану ТГ на заводі-виробнику

Назва вузла	Встановлені датчики,	Контроль параметрів
Статор	Температурні датчики	Стежать за температурним станом обмоток
	Датчики електричних параметрів	Вимірюють величину струму та напруги, стан ізоляції
	Датчики вібрації	Виявлення стану шихтованого осердя статора, бандажів, діафрагм, клинів
Ротор	Датчики вібрації	Виявлення дисбалансу мас, що обертаються; виявлення наявних та скритих дефектів, механічних дефектів ротора та супутніх під'єднаних систем
	Температурні датчики	Контроль нагріву елементів ТГ, в першу чергу, обмоток
Вальниці	Датчики вібрації	Виявляють зношення вкладишів, несосності валів ТГ і турбін, перекося
	Температурні датчики	Тепловий стан підшипників ковзання
Система охолодження (водень, вода або повітря)	Датчики тиску	Перевірка герметичності окремих елементів (стрижнів обмоток статора, ущільнень в місцях виходу валу) і працездатності ущільнень
	Температурні датчики	Контроль ефективності охолодження
Система змащення вальниць	Датчики тиску оливи	Показують достатність подачі оливи в підшипники ковзання
	Температурні датчики оливи	Контроль температури (при необхідності – контроль можливої появи підшипникових струмів)

Виводи струму /напруги	Датчики контролю якості електроенергії	Контроль характеристик якості електроенергії (в виводах обмотки статора в місцях підключення ТГ до мережі через блоковий трансформатор)
------------------------	--	---

Аналізувати таку кількість даних датчиків для людини складно, навіть без додавання додаткових інформаційних каналів. Це робить систему діагностики менш надійною і підвищує ризик розвитку прихованих дефектів, які можуть розвиватися непомітно і викликати аварії. Тому в сучасності для цього необхідним та можливим є впровадження ІІІ – автоматизація процесів діагностики, передача модулів онлайн-аналітики наступних функцій [6, 8, 26, 27]:

- використовувати автоматизовану, прогнозну і масштабовану діагностику для розширеної кількості датчиків контролю стану ТГ в режимі онлайн. Впровадження для моніторингу стану ТГ в реальному часі сенсорних мереж та можливостей «інтернету речей» дозволить своєчасно прогнозувати відмови, оптимізувати режими роботи та знизити витрати на обслуговування. На відміну від людини, система здатна одночасно аналізувати сотні інформаційних потоків в режимі 24/7 без втрати можливості прийому, аналізу, вибору і формулюванню рекомендацій щодо практичних дій;

- цифрова уніфікація і централізоване зберігання отриманих даних в сховище даних, де вони зберігаються для довгострокового аналізу, що усуває проблему збереження і системного аналізу розрізнених локальних сигналів. Важливою функцією ІІІ на цьому етапі є попередня фільтрація вхідних даних («очищення від шумів»): застаріле обладнання ТЕС генерує хибні сплески показників через вібрацію, електромагнітні наводки або власні несправності. Інтелектуальні алгоритми дозволяють перевіряти сигнали в реальному часі, відрізняючи реальні технологічні відхилення від помилкових спрацювань, що значно підвищує достовірність діагностики та запобігає безпідставним зупинкам. Постійно в режимі онлайн виконується перевірка всіх параметрів на предмет перевищення граничних значень (уставок). Саме це при ручному контролі і керуванні найбільше завантажувала оператора. ІІІ передає оператору інформацію тільки при перевищенні «порогів» допустимих значень контрольованих параметрів, рис. 2;

- проведення статистичного аналізу та автоматичне створення прогнозу подальшої зміни параметрів, що перевищили граничні значення. Виявлення негативних тенденції збільшення показників (наприклад, зростання температури, шуму або вібрації), визначення наявності та швидкості росту зовнішніх та внутрішніх дефектів. Розробка пропозицій щодо гальмування, а краще зупинки, розвитку дефектів задовго до того, як вони досягнуть критичної межі [28-31];

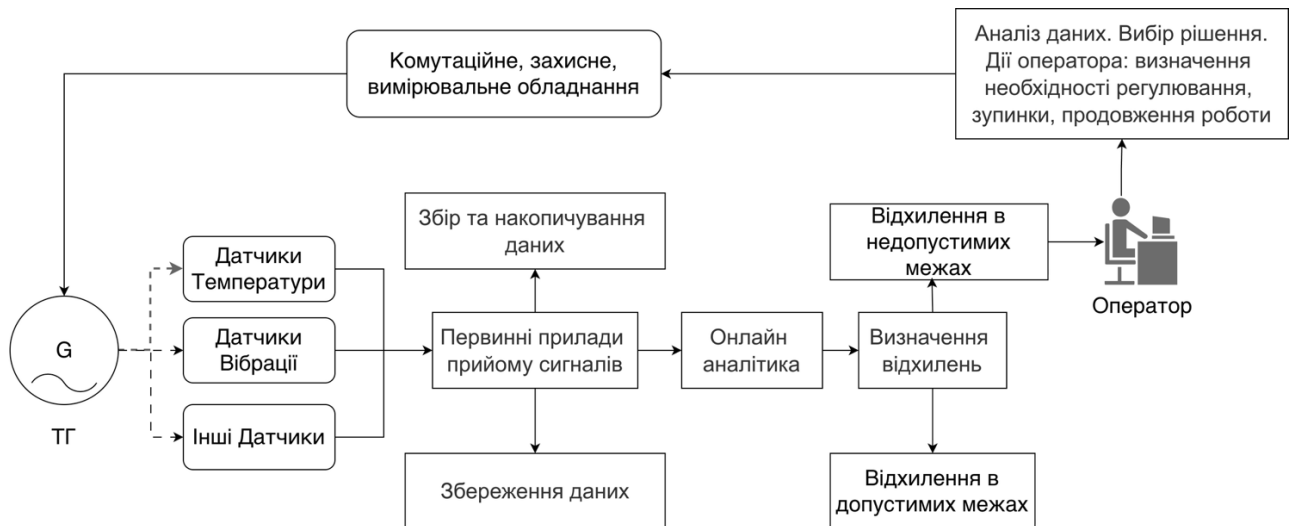


Рисунок 2 – Схема моніторингу та діагностики ТГ з передачею частини функцій контролю від оператора до ШІ

- з використанням ШІ можливе створення цифрових моделей ТГ – цифрових двійників (*Digital Twins*), тобто математичної моделі ТГ, його параметрів, що оновлюються в реальному часі. Саме для ТГ найбільш перспективним є впровадження таких моделей для визначення впливу на їх робочі параметри та характеристики наростаючого рівню зносу, для вибору оптимальних режимів експлуатації та видів обслуговування, прогнозування зміни стану та можливих відмов без втручання в реальну фізичну конструкцію. ТГ має постійний взаємний зв'язок зі своєю віртуальною моделлю, що забезпечує точність оцінки його стану та підвищує надійність роботи [32, 33].

У традиційній системі моніторингу (рис. 1) оператор був змушений одночасно відстежувати десятки незв'язаних, змінних сигналів (температура, вібрація, тиск) і, покладаючись на власний досвід та інтуїцію, виявляти зміни та межі відхилення. Такий підхід несе високі ризики пропуску прихованих дефектів,

особливо в умовах стресу чи втоми. Запропонована схема з використанням ШІ (рис. 2) кардинально змінює цей процес. Система бере на себе рутинні, обчислювальні завдання, а роль оператора змінюється від пасивного отримувача даних до активного суб'єкта створення рішень. Система ШІ навіть може пропонувати оператору первинні дії, щодо зниження впливу дефектів, які призвели до відхилення параметрів. На рис. 2 була наведена схема онлайн діагностики ТГ з використанням ШІ, де показано як, на якому етапі передати ШІ частину функцій контролю від людини-оператора. Впровадження системи ШІ для онлайн-діагностики фундаментально змінює структуру роботи оперативного персоналу (диспетчерів), зміщуючи акцент з прямого, постійного контролю показників датчиків на прийняття важливих рішень щодо практичних дій. Це практично повністю знімає проблему інформаційного перенавантаження людини-оператора, знижує ризик вибору помилкових рішень та несвоєчасного виявлення аварійних ситуацій через «людський фактор». Це дозволяє встановлювати необхідну кількість датчиків, своєчасно отримувати повну інформацію щодо стану ТГ, миттєво опрацьовувати її, приймати найкращі рішення в регулюванні та обслуговуванні ТГ. Однак слід пам'ятати, що зростання залежності від цифрових систем підвищує ризики кібератак, що вимагає впровадження надійних систем кіберзахисту [34].

Схема моніторингу та діагностики ТГ з передачею частини функцій контролю від оператора до ШІ (рис. 2) складається з двох блоків: безпосередньо ТГ з системою збору і накопичення даних, рис. 3, і другий блок – блок аналізу даних (в режимі реального часу та схема прийняття рішень, рис. 4).

Для технічної реалізації блоку «Онлайн аналітика» (рис. 4) доцільно використовувати гібридний підхід до машинного навчання. Для прогнозування динаміки параметрів та аналізу часових рядів (наприклад, виявлення зростання температури) найбільш ефективними є рекурентні нейронні мережі (RNN) або мережі довгої короткострокової пам'яті (LSTM), [10, 21, 26]. Водночас, для задачі класифікації дефектів за спектром вібрації доцільно застосовувати згорткові нейронні мережі (CNN), які здатні з високою точністю розпізнавати специфічні

візуальні патерни на спектрограмах сигналів, характерні для різних типів пошкоджень [27, 32].

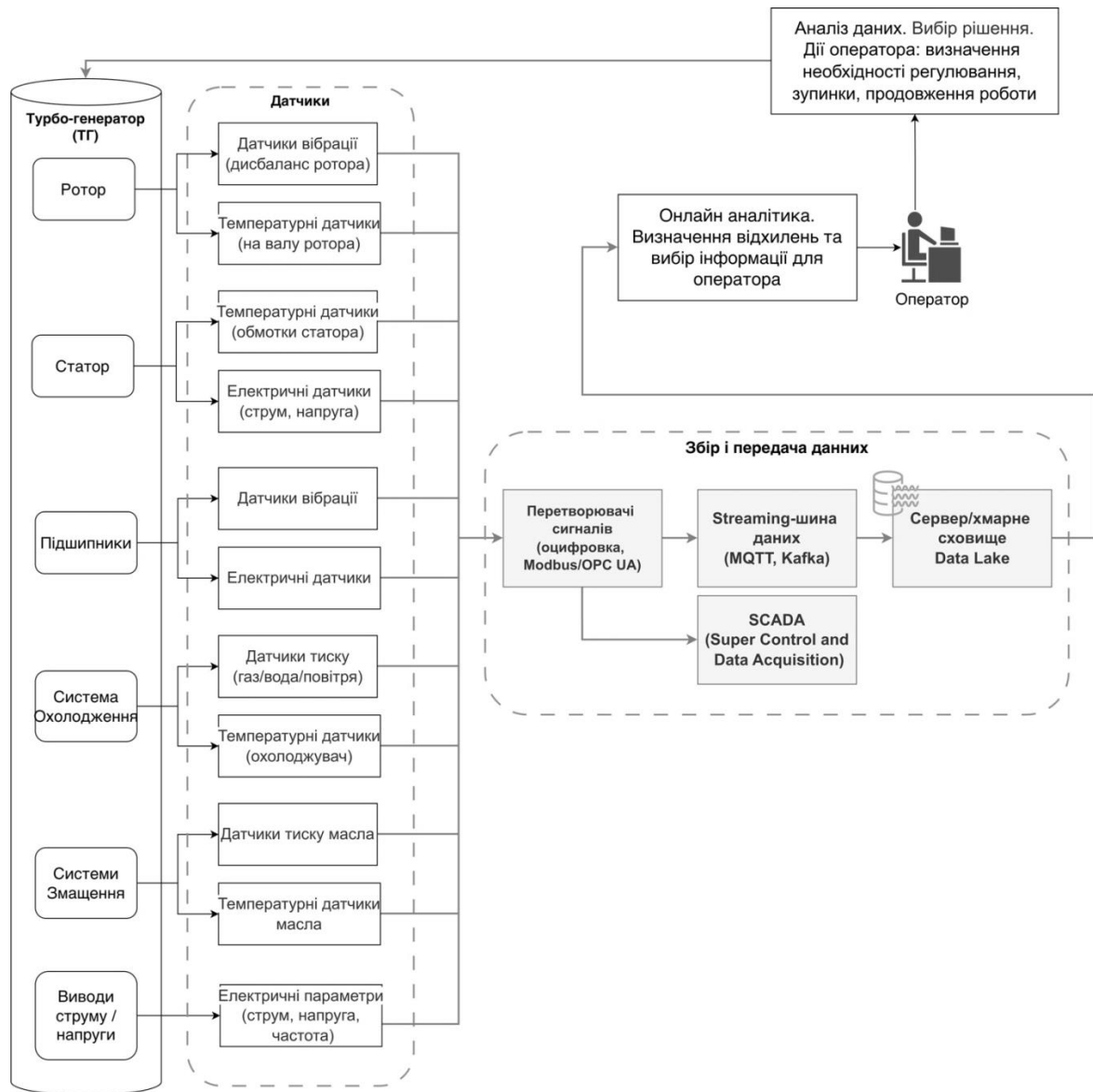


Рисунок 3 – Перший блок організації контролю стану ТГ з системою збору і накопичення даних



Рисунок 4 – Другий блок організації контролю стану ТГ з системою аналізу даних в режимі реального часу та прийняття рішень

Висновки.

1. В сучасних умовах української енергосистеми, забезпечення надійної експлуатації турбогенераторів ТЕС є критично важливим. Поєднання значного фізичного зносу ТГ та супутніх систем, постійна робота в неномінальних режимах, в декількох перехідних режимах інколи на протязі доби, умови воєнного стану створюють безпрецедентні ризики для надійної роботи ТГ та стабільності генерації електроенергії.

2. Для забезпечення надійної роботи ТГ в сучасних умовах з врахуванням значного фізичного зносу необхідно збільшити кількість контрольованих параметрів шляхом більшої кількості каналів онлайн-діагностики, але без додаткового навантаження на персонал. Це дозволить своєчасно виявляти явні та приховані дефекти, усувати їх або гальмувати швидкість розвитку ще до аварійної стадії, скоротити кількість аварійних зупинок та позапланових ремонтів.

3. Для обмеження дії людського фактору в процесі постійного контролю стану ТГ слід використовувати автоматизовані системи онлайн-діагностики, що базується на використанні ШІ. Це вимагає проведення комплексної цифровізації системи діагностики: збір даних, їх централізоване зберігання, впровадження багаторівневої аналітики для проведення повної діагностики, статистичне

прогнозування зміни стану ТГ, можливостей його подальшої роботи, виконання класифікації дефектів, прогнозування залишкового ресурсу.

4. Впровадження системи ШІ не замінює людину повністю, а є потужним інструментом підтримки її діяльності, вона виконує завдання, які є практично неможливими для людини в режимі реального часу. Автоматизовані системи беруть на себе рутинний аналіз великих масивів даних, залишаючи оператору тільки прийняття ключових рішень. Система виявляє відхилення робочих параметрів, автоматичне розпізнає тип дефекту по даним, що отримані безпосередньо в онлайн режимі та по базовим архівним даним, прогнозує залишковий ресурс експлуатації ТГ. Рутинну роботу робить система, оператор отримує від неї конкретні рекомендації, оцінює ситуацію та приймає рішення. Це значно знижує ймовірність помилок через перевантаження або втому

5. До найбільш перспективних напрямків підтримки ТГ в робочому стані для виявлення закономірностей взаємного впливу зміни різних фізичних параметрів ТГ та для прогнозування терміну його експлуатації слід віднести створення цифрових моделей ТГ– «цифрових двійників». Цифровий двійник ТГ забезпечить своєчасне визначення впливу зносу на робочі параметри та характеристики, дозволить встановити напрямки оптимізації режимів експлуатації та обслуговування в різних режимах без фізичного втручання в реальну конструкцію. Реальний ТГ має постійний взаємний зв'язок зі своєю віртуальною моделлю, що забезпечує найбільшу точність оцінки його стану та підвищує надійність роботи.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Лазуренко К. О., Шевченко В. В. Сучасна роль та перспективи ТЕС у концепції «Індустрія 4.0». Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXIII міжнародної НПК (MicroCAD-2025) (Україна, Харків, НТУ «ХПІ», 14–17 травня 2025 р.). С. 84. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15520912>
2. Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. Algorithm of choosing type of mechanical assembly production of instrument making enterprises of Industry 4.0. // International Conference Information Technologies in Business and Industry, Journal of Physics: Conference Series, 2018. – Series 1015 052033. doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052033
3. Суходоля О. М., Харазішвілі Ю. М., Бобро Д. Г., Рябцев Г. Л., Завгородня С. П. Визначення рівня енергетичної безпеки України. Аналітична доповідь. Київ : 2021. 71 с. https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-06/analytrep_02_2022.pdf

4. Денисюк С. П. Особливості реалізації політики енергоефективності – пріоритети України // *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2013. № 3. С. 7–20. <https://files.core.ac.uk/download/pdf/47229989.pdf>
5. Олександра Худякова. Міненерго: Всі великі ТЕС і ГЕС України пошкоджені. // *Економіка. Україна*. – 21.11.2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dw.com/uk/minenergo-vsi-veliki-teplovi-ta-gidroelektrostantsii-ukraini-poskodzeni/a-74844474>
6. Лазуренко К. О., Шевченко В. В. Використання можливостей сучасних технологій on-line контролю стану турбогенераторів з метою зниження кількості їх аварійних зупинок. // *Харків: Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2025. № 6(209). С. 23–41. doi: 10.20998/2313-8890.2025.06.03
7. Polyakov R. N., Krupenin N. V., Kudryavcev I. E. et al. Overview of turbogenerator monitoring and diagnostic systems // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. 1515, 052063. Pp. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/1515/5/052063
8. Shevchenko V. V., Lazurenko K. O. Assessment of the Extending Possibility the Turbogenerators Service Life at Thermal and Nuclear Power Plants During War Conditions. // *Second International Virtual Conference on Ukraine. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, August 22-23, 2025*. <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox?projector=1>
9. Vijayalakshmi S., Ramachandran B. Intelligent Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Deep Learning Algorithms: A Comparative Analysis of MLP, CNN, RNN, and LSTM // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2024. Vol. 11, Iss. 9. Pp. 294–315.
10. Zaid Allal, Hassan N. Noura, Ola Salman, Khaled Chahine. Leveraging the power of machine learning and data balancing techniques to evaluate stability in smart grids // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024. Volume 133, Part C, 108304. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197624004627>
11. Алтухова Т. В. Методи діагностики відмов електромеханічного обладнання на основі технологій штучного інтелекту // *Індустріальний інститут Державного ВНЗ «Донецький НТУ»*, 2017. С. 61–70. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/736254>
12. Ковтуненко Ю.В. Застосування штучного інтелекту у системі управління підприємством: проблеми та переваги // *Економічний вісник Одеського політехнічного університету*, 2019. №2 (8). С. 93–99. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://economics.net.ua/ejoru/2019/No2/93.pdf>
13. Колларов О. Ю., Остренко Д. О. Інтелектуальна діагностика електричних мереж // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*, 2022. № 2(27). С. 63–67. <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2022-2-63-67.pdf>
14. Кузнєцов Д. І., Купін А. І. Визначення оптимальної навчаючої вибірки для нейромережі в задачах ідентифікації електрообладнання // *Вісник Хмельницького національного університету*, 2013. № 2. С. 226–230. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2013_2/52kuz.pdf
15. Shevchenko V. V., Lazurenko K. O. Statistical analysis of obvious and hidden defects of thermal power plants turbogenerators and assessment of damage from their failures. // *XL International scientific and practical conference «Mechanisms of Development of the Scientific and Technical Potential of Modern Society» Salzburg, Austria. International Scientific Unity*, 2024. Pp. 213–217. DOI 10.70286/ISU-25.09.2024
16. Industrial IoT and Industry 4.0 Guidelines. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iiconsortium.org/pdf/IIRA-v1.9.pdf>
17. International Atomic Energy Agency. Ageing Management and Development of a Programmer for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-48. Vienna: IAEA; 2018. 65 p. Available at: <https://www.iaea.org/publications/12240/>
18. Shevchenko V. V., Shevchenko A. S., Kucherenko S. M., Kucherenko N. S. «Human factor» in emergency situations development at Nuclear Power Plants in the conditions of war // *Inter Collegas*, 2022. № 9(2). Pp. 11–19. <https://doi.org/10.35339/ic.9.2.ssk>

19. Kumar P.G.S., Kumar Kalyan K. Condition assessment program on aged high voltage insulation of in-service turbine generator. // *IEEE, International Conference on Control Communication & Computing India*, 19–21 November 2015. Pp. 265–270. <https://doi.org/10.1109/ICCC.2015.7432903>
20. Kumenko A. I. Prospects for the development of diagnostic systems for the technical condition of TPP generating equipment. State and development of domestic vibration control and diagnostics systems // *Assembly in mechanical engineering, instrument making*, 2008. No.2. Pp. 25–37.
21. Labati R. D., Genovese A., Mun˜oz E., et al. Computational intelligence for industrial and environmental applications // *Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems*, Sofia, Bulgaria, September 2016. No. 4–6. P. 8–14. <https://piurilabs.di.unimi.it/Papers/is2016.pdf>
22. Nima Hajimirza A., Armita Firoozi F. Leveraging Machine Learning for Prediction and Optimizing Renewable Energy Systems // Department of energy engineering and industry, science and research branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran, 2023. – Postal Code: 14778893855. DOI: 10.14293/PR2199.000003.v1. <https://surl.li/qbbrak>
23. On-Line Diagnosis of Turbine-Generators using Artificial Intelligence // *IEEE Transactions on Energy Conversion publishes*, 1986. Vol.: EC-1, Issue 2. Pp. 68–74. DOI: 10.1109/TEC.1986.4765702
24. Real-time Systems in Industrial Applications. *IEEE Industrial Electronics*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/1000351/all-proceedings>
25. Phloymuk N., Pattanadech N. The aging of the insulation system of large rotating machines in frequency domains. // 5th International conference on engineering, applied sciences and technology (ICEAST), Luang Prabang, Laos, 2019, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEAST.2019.8802581>.
26. Patel A., Sharma R. AI-Driven decision-making models for thermal power plant operations // *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 2025. Vol. 9, Iss. 6. P. 112–125.
27. Ahsan M. and Bismor D. Early-stage fault diagnosis for rotating element bearing using improved harmony search algorithm with different fitness functions,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1–9, 2022.
28. Al-Hajjar M., Waqar Hassan M., Rodriguez Jose, Abdelrahman M. Enhanced Fault Diagnosis in Rotating Machinery Using a Hybrid CWT-LeNet-5-LSTM Model // *IEEE Access*, 2025 Vol. 13. P. 1023–1035. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025IEEEA..13.1026A/abstract>
29. Babin A., Polyakov R., Savin L., Tyurin V. Statistical analysis of turbo generator sets failure causes. *Vibroeng PROCEDIA*, 2020. No.31. Pp. 129–133. <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21331>
30. Contin A, Tassarolo A (2008) Identification of defects generating PD in AC rotating machines by means of fuzzy-tools. // Conference record of the 2008 IEEE international symposium on electrical insulation, Vancouver, BC, Canada. Pp. 558–562. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570394>
31. Environmental Impact Assessment in Manufacturing. ISO 14001. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>
32. Denis Ilic, Mileta Zarkovic, Zlatan Stojkovic. Artificial intelligence system for stator condition diagnostic. // *Electrical Engineering*, 2022. Vol. 104. Pp. 1503–1513. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00202-021-01402-6>
33. Guryanov A. V., Zakoldaev D. A., Shukalov A. V. et al. Organization of digital productions of Industry 4.0 based on cyberphysical systems and ontologies Scientific and technical // *Bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 2018. Iss. 18(2). Pp. 268–77. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/5/052063/pdf>
34. Alkis MA. Threat of nuclear terrorism: The developing nuclear security regime. // *International Journal of Nuclear Security*, 2022. No. 7(1): Article 17. Available at: <https://is.gd/f407NL>

REFERENCES:

- 1 Lazurenko K. O., Shevchenko V. V. (2025). Suchasna rol ta perspektyvy TES u kontseptsii «Industriia 4.0» [Modern role and prospects of TPPs in the concept of "Industry 4.0"]. *Informatsiini*

- tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei XXXIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (MicroCAD-2025), 84. Kharkiv : NTU "KhPI". (in Ukrainian)
2. Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., Zharinov I. O., Zharinov O. O. (2018). Algorithm of choosing type of mechanical assembly production of instrument making enterprises of Industry 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015, 052033. doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052033
 3. Sukhodolia O. M., Kharazishvili Yu. M., Bobro D. H., Riabtsev H. L., Zavhorodnia S. P. (2021). *Vyznachennia rivnia enerhetychnoi bezpeky Ukrainy. Analitychna dopovid* [Determination of the level of energy security of Ukraine. Analytical report]. Kyiv: NISS. Retrieved from https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-06/analytrep_02_2022.pdf (in Ukrainian)
 4. Denysiuk S. P. (2013). Osoblyvosti realizatsii polityky enerhoefektyvnosti – priorityty Ukrainy [Features of energy efficiency policy implementation – priorities of Ukraine]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnologii, ekolohiia*, 3, 7–20. Retrieved from <https://files.core.ac.uk/download/pdf/47229989.pdf> (in Ukrainian)
 5. Khudiakova O. (2025, November 21). Minenerho: Vsi velyki TES i HES Ukrainy poskodzheni [Ministry of Energy: All major TPPs and HPPs of Ukraine are damaged]. *Ekonomika. Ukraina*. Retrieved from <https://www.dw.com/uk/minenergo-vsi-veliki-teplov-ta-gidroelektrostantsii-ukraini-poskodzeni/a-74844474> (in Ukrainian)
 6. Lazurenko K. O., Shevchenko V. V. (2025). Vykorystannia mozhlyvostei suchasnykh tekhnologii on-line kontroliu stanu turbogeneratoriv z metoiu znyzhennia kilkosti yikh avariinykh zupynok [Using the capabilities of modern on-line monitoring technologies for turbogenerators to reduce the number of their emergency shutdowns]. *Enerhetyka, elektronika ta elektromekhanika*, 6(209), 23-41. doi: 10.20998/2313-8890.2025.06.03 (in Ukrainian)
 7. Polyakov R. N., Krupenin N. V., Kudryavcev I. E., et al. (2020). Overview of turbogenerator monitoring and diagnostic systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515, 052063. doi: 10.1088/1742-6596/1515/5/052063
 8. Shevchenko V. V., Lazurenko K. O. (2025). Assessment of the Extending Possibility the Turbogenerators Service Life at Thermal and Nuclear Power Plants During War Conditions. *Conference Program Second International Virtual Conference on Ukraine*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.
 9. Vijayalakshmi S., Ramachandran B. (2024). Intelligent Fault Diagnosis of Rotating Machinery Using Deep Learning Algorithms: A Comparative Analysis of MLP, CNN, RNN, and LSTM. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11(9), 294–315.
 10. Zaid Allal, Hassan N. Noura, Ola Salman, & Khaled Chahine. (2024). Leveraging the power of machine learning and data balancing techniques to evaluate stability in smart grids. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133(C), 108304. doi: 10.1016/j.engappai.2024.108304
 11. Altukhova T. V. (2017). Metody diahnostryky vidmov elektromekhanichnoho obladnannia na osnovi tekhnologii shtuchnoho intelektu [Methods of diagnosing failures of electromechanical equipment based on artificial intelligence technologies]. *Industrialnyi instytut Derzhavnoho VNZ «Donetskyi NTU»*, 61–70. (in Ukrainian)
 12. Kovtunenکو Yu. V. (2019). Zastosuvannia shtuchnoho intelektu u systemi upravlinnia pidpriemstvom: problemy ta perevahy [Application of artificial intelligence in the enterprise management system: problems and advantages]. *Ekonomichnyi visnyk Odeskoho politekhnichnoho universytetu*, 2(8). 93–99. Retrieved from <https://economics.net.ua/ejopu/2019/No2/93.pdf> (in Ukrainian)
 13. Kollarov O. Yu., Ostrenko D. O. (2022). Intelektualna diahnostryka elektrychnykh merezh [Intelligent diagnostics of electrical networks]. *Naukovi pratsi DonNTU. Serii: «Elektrotekhnika i enerhetyka»*, 2(27), 63–67. Retrieved from <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2022-2-63-67.pdf> (in Ukrainian)
 14. Kuznietsov D. I., Kupin A. I. (2013). Vyznachennia optymalnoi navchaiuchoi vybirky dlia neiromerezhi v zadachakh identyfikatsii elektroobladnannia [Determination of the optimal training sample for a neural network in electrical equipment identification tasks]. *Visnyk Khmelnytskoho*

- natsionalnoho universytetu, 2, 226–230. Retrieved from https://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2013_2/52kuz.pdf (in Ukrainian)
15. Shevchenko V. V., Lazurenko K. O. (2024). Statistical analysis of obvious and hidden defects of thermal power plants turbogenerators and assessment of damage from their failures. *XL International scientific and practical conference «Mechanisms of Development of the Scientific and Technical Potential of Modern Society»*, 213–217. Salzburg, Austria: International Scientific Unity. doi: 10.70286/ISU-25.09.2024
16. Industrial Internet Consortium. (n.d.). *Industrial IoT and Industry 4.0 Guidelines*. Retrieved from <https://www.iiconsortium.org/pdf/IIRA-v1.9.pdf>
17. International Atomic Energy Agency. (2018). *Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants* (IAEA Safety Standards Series No. SSG-48). Vienna: IAEA.
18. Shevchenko V. V., Shevchenko A. S., Kucherenko S. M., Kucherenko N. S. (2022). "Human factor" in emergency situations development at Nuclear Power Plants in the conditions of war. *Inter Collegas*, 9(2), 11–19. doi: 10.35339/ic.9.2.ssk
19. Kumar P. G. S., Kumar Kalyan K. (2015). Condition assessment program on aged high voltage insulation of in-service turbine generator. *IEEE International Conference on Control Communication & Computing India*, 265–270. doi: 10.1109/ICCC.2015.7432903
20. Kumenko, A. I. (2008). Prospects for the development of diagnostic systems for the technical condition of TPP generating equipment. State and development of domestic vibration control and diagnostics systems. *Assembly in mechanical engineering, instrument making*, 2, 25–37.
21. Labati R. D., Genovese A., Munoz E., et al. (2016). Computational intelligence for industrial and environmental applications. *Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems*, 8–14. Sofia, Bulgaria.
22. Nima Hajimirza A., Armita Firoozi F. (2023). Leveraging Machine Learning for Prediction and Optimizing Renewable Energy Systems. *Department of energy engineering and industry, science and research branch, Islamic Azad university*. doi: 10.14293/PR2199.000003.v1
23. IEEE Power Engineering Society. (1986). On-Line Diagnosis of Turbine-Generators using Artificial Intelligence. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, EC-1(2), 68–74. doi: 10.1109/TEC.1986.4765702
24. IEEE Industrial Electronics. (n.d.). *Real-time Systems in Industrial Applications*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/1000351/all-proceedings>
25. Phloymuk N., Pattanadech N. (2019). The aging of the insulation system of large rotating machines in frequency domains. *5th International conference on engineering, applied sciences and technology (ICEAST)*, 1–4. Luang Prabang, Laos. doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802581
26. Patel A., Sharma R. (2025). AI-Driven decision-making models for thermal power plant operations. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 9(6), 112–125.
27. Ahsan M., Bismor D. (2022). Early-stage fault diagnosis for rotating element bearing using improved harmony search algorithm with different fitness functions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1–9.
28. Al-Hajjar M., Waqar Hassan M., Rodriguez J., Abdelrahman M. (2025). Enhanced Fault Diagnosis in Rotating Machinery Using a Hybrid CWT-LeNet-5-LSTM Model. *IEEE Access*, 13, 1023–1035.
29. Babin A., Polyakov R., Savin L., Tyurin V. (2020). Statistical analysis of turbo generator sets failure causes. *Vibroeng PROCEDIA*, 31, 129–133. doi: 10.21595/vp.2020.21331
30. Contin A., Tassarolo A. (2008). Identification of defects generating PD in AC rotating machines by means of fuzzy-tools. *Conference record of the 2008 IEEE international symposium on electrical insulation*, 558–562. Vancouver, BC, Canada. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570394
31. ISO. (n.d.). *Environmental Impact Assessment in Manufacturing. ISO 14001*. Retrieved from <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>
32. Ilic, D., Zarkovic, M., & Stojkovic, Z. (2022). Artificial intelligence system for stator condition diagnostic. *Electrical Engineering*, 104, 1503–1513. doi: 10.1007/s00202-021-01402-6

33. Guryanov A. V., Zakoldaev D. A., Shukalov A. V., et al. (2018). Organization of digital productions of Industry 4.0 based on cyberphysical systems and ontologies Scientific and technical. *Bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 18(2), 268-277.
34. Alkis M. A. (2022). Threat of nuclear terrorism: The developing nuclear security regime. *International Journal of Nuclear Security*, 7(1), Article 17.

*Стаття надійшла до редакції: 22.09.2025; рецензування: 25.09.2025;
прийнята до публікації 08.10.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.
The article was submitted on 22.09.2025; revised on 25.09.2025; and accepted for publication
on 08.10.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.*