Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕС-Е24 мг
Спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
_____ / Іван ЛОГВИН
(підпис) (ім'я та прізвище)
Керівник _____ / Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
Рецензент _____ /Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ /Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Секретар ЕК _____ /Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____
(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«15» 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Іван ЛОГВИН

1. Тема «Розробка автоматизованої системи безперервного моніторингу аварійних ситуацій у технологічному процесі енергоблоку електростанції» затверджена наказом по академії 4801-5/3665 від «06» жовтня 2025 р.
2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання
4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИЯВЛЕННЯ АВАРІЙНИХ ОЗНАК У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ; РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ; РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО МОДУЛЯ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ВИЯВЛЕННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		ання видав	авдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025р.

Керівник _____ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Іван ЛОГВИН
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.25 – 05.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.25 – 15.10.25	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 – 07.12.25	

Студент (ка) _____ Іван ЛОГВИН
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 71; рисунків – 3;
таблиць – 5; літературних джерел – 28.

Енергетичний сектор, зокрема теплові та атомні електростанції, працюють у складних і небезпечних умовах, де будь-яке порушення в роботі обладнання може призвести до серйозних наслідків, таких як відключення енергоблока, екологічні катастрофи або навіть загроза життю персоналу. Основними причинами аварій на енергоблоках є неправильне функціонування складних технологічних систем, а також недостатня оперативність у виявленні аномальних ситуацій. Виявлення відхилень від нормальних параметрів роботи на ранніх стадіях є ключем до запобігання серйозним поломкам і забезпечення безпеки. Для ефективного виявлення аварійних ознак необхідно застосовувати новітні підходи, зокрема автоматизовані системи, здатні виявляти зміни в технологічних процесах в реальному часі. Інтеграція сучасних інформаційних технологій, таких як аналіз великих даних, інтернет речей, машинне навчання та штучний інтелект, дозволяє значно підвищити точність моніторингу та знизити час на виявлення та реагування на аварії. Однак наявні системи моніторингу часто не здатні автоматично ідентифікувати складні аномалії або взаємозв'язки між різними параметрами, що вимагає подальшої розробки нових підходів до автоматизації цього процесу.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи безперервного моніторингу аварійних ситуацій у технологічному процесі енергоблоку електростанції для виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку, який забезпечить своєчасне виявлення аномальних подій і дозволить оперативно реагувати на потенційні аварії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку **науково-практичних завдань:**

- розробити математичні моделі для виявлення аварійних ознак, побудувати алгоритми для їх виявлення на основі аналізу даних:

- запропонувати методи інтеграції цього модуля в існуючі автоматизовані системи управління енергоблоками.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси на енергоблоках електростанцій, зокрема процеси контролю, моніторингу та діагностики стану енергоблоків. Сюди входять параметри, які вимірюються на енергоблоці, такі як температура, тиск, витрати палива, температура, а також інші критичні параметри, що забезпечують безпечну роботу енергетичного обладнання.

Предметом дослідження є система автоматизованого моніторингу технологічних процесів енергоблоку на електростанціях, зокрема, розробка та впровадження автоматизованого модуля для виявлення аварійних ознак у цих процесах. Це включає розробку математичних моделей для виявлення аномальних подій і аварій, а також алгоритмів, які дозволяють своєчасно і точно виявляти відхилення від нормального режиму роботи енергоблоку.

Теоретична значимість дослідження полягає в створенні нових наукових підходів до автоматизації виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоків, що включає інтеграцію сучасних технологій, розробку нових моделей діагностики, прогнозування і управління. Ці розробки сприяють підвищенню надійності, безпеки та ефективності енергетичних систем, що має фундаментальне значення для забезпечення стабільної роботи енергетичної інфраструктури в умовах сучасних викликів.

Практична значущість роботи полягає в тому, що розроблений модуль дозволить забезпечити стабільну роботу енергоблоків шляхом зменшення ймовірності аварій, оптимізації технічного обслуговування та зниження ризиків для персоналу. Впровадження автоматизованих систем моніторингу в реальних умовах сприятиме підвищенню ефективності

експлуатації електростанцій та скороченню витрат на їх ремонт та обслуговування.

ABSTRACT

Pages of text – 71; pictures – 3;
tables – 5; literary sources – 28.

The energy sector, particularly thermal and nuclear power plants, operates under complex and hazardous conditions, where any malfunction of equipment can lead to serious consequences, such as unit shutdowns, environmental disasters, or even threats to personnel safety. The primary causes of accidents at power units include improper functioning of complex technological systems, as well as insufficient responsiveness in detecting abnormal situations. Early detection of deviations from normal operating parameters is key to preventing serious failures and ensuring safety.

To effectively identify emergency indicators, it is necessary to apply advanced approaches, particularly automated systems capable of detecting changes in technological processes in real time. The integration of modern information technologies, such as big data analytics, the Internet of Things, machine learning, and artificial intelligence, significantly improves monitoring accuracy and reduces the time required to detect and respond to emergencies. However, existing monitoring systems are often unable to automatically identify complex anomalies or relationships between different parameters, which necessitates further development of new approaches to process automation.

The aim of this work is to develop an automated system for continuous monitoring of emergency situations in the technological process of a power unit at a power plant, aimed at detecting emergency indicators in technological processes, ensuring timely identification of abnormal events, and enabling prompt response to potential accidents.

To achieve this goal, it is necessary to solve a number of scientific and practical tasks:

- to develop mathematical models for detecting emergency indicators and to construct algorithms for their identification based on data analysis;

- to propose methods for integrating this module into existing automated control systems of power units.

The object of the study is the technological processes at power plant units, particularly the processes of control, monitoring, and diagnostics of power unit conditions. This includes parameters measured at the power unit, such as temperature, pressure, fuel consumption, as well as other critical parameters ensuring the safe operation of energy equipment.

The subject of the study is the system of automated monitoring of technological processes of power units at power plants, in particular, the development and implementation of an automated module for detecting emergency indicators in these processes. This includes the development of mathematical models for detecting abnormal events and accidents, as well as algorithms that enable timely and accurate identification of deviations from normal operating conditions.

The theoretical significance of the research lies in the development of new scientific approaches to automating the detection of emergency indicators in technological processes of power units, including the integration of modern technologies and the development of new models for diagnostics, forecasting, and control. These developments contribute to improving the reliability, safety, and efficiency of energy systems, which is of fundamental importance for ensuring the stable operation of energy infrastructure under modern challenges.

The practical significance of the work lies in the fact that the developed module will ensure stable operation of power units by reducing the probability of accidents, optimizing maintenance, and minimizing risks to personnel. The implementation of automated monitoring systems in real operating conditions will enhance the efficiency of power plant operation and reduce costs associated with repair and maintenance.

ЗМІСТ

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми дослідження зумовлена невідкладною необхідністю забезпечення стабільної, безпечної та ефективної роботи енергоблоків на сучасних електростанціях. Підвищення вимог до надійності енергетичних систем, необхідність мінімізації аварійних ситуацій та забезпечення безперебійного постачання електричної енергії визначають важливість ефективного моніторингу та виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку.

Енергетичний сектор, зокрема теплові та атомні електростанції, працюють у складних і небезпечних умовах, де будь-яке порушення в роботі обладнання може призвести до серйозних наслідків, таких як відключення енергоблока, екологічні катастрофи або навіть загроза життю персоналу. Основними причинами аварій на енергоблоках є неправильне функціонування складних технологічних систем, а також недостатня оперативність у виявленні аномальних ситуацій. Виявлення відхилень від нормальних параметрів роботи на ранніх стадіях є ключем до запобігання серйозним поломкам і забезпечення безпеки. Для ефективного виявлення аварійних ознак необхідно застосовувати новітні підходи, зокрема автоматизовані системи, здатні виявляти зміни в технологічних процесах в реальному часі. Інтеграція сучасних інформаційних технологій, таких як аналіз великих даних, інтернет речей, машинне навчання та штучний інтелект, дозволяє значно підвищити точність моніторингу та знизити час на виявлення та реагування на аварії. Однак наявні системи моніторингу часто не здатні автоматично ідентифікувати складні аномалії або взаємозв'язки між різними параметрами, що вимагає подальшої розробки нових підходів до автоматизації цього процесу.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи безперервного моніторингу аварійних ситуацій у технологічному процесі енергоблоку електростанції для виявлення аварійних ознак у технологічних процесах

енергоблоку, який забезпечить своєчасне виявлення аномальних подій і дозволить оперативно реагувати на потенційні аварії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку науково-практичних завдань:

- розробити математичні моделі для виявлення аварійних ознак, побудувати алгоритми для їх виявлення на основі аналізу даних:

- запропонувати методи інтеграції цього модуля в існуючі автоматизовані системи управління енергоблоками.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси на енергоблоках електростанцій, зокрема процеси контролю, моніторингу та діагностики стану енергоблоків. Сюди входять параметри, які вимірюються на енергоблоці, такі як температура, тиск, витрати палива, температура, а також інші критичні параметри, що забезпечують безпечну роботу енергетичного обладнання.

Предметом дослідження є система автоматизованого моніторингу технологічних процесів енергоблоку на електростанціях, зокрема, розробка та впровадження автоматизованого модуля для виявлення аварійних ознак у цих процесах. Це включає розробку математичних моделей для виявлення аномальних подій і аварій, а також алгоритмів, які дозволяють своєчасно і точно виявляти відхилення від нормального режиму роботи енергоблоку.

Теоретична значимість дослідження полягає в створенні нових наукових підходів до автоматизації виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоків, що включає інтеграцію сучасних технологій, розробку нових моделей діагностики, прогнозування і управління. Ці розробки сприяють підвищенню надійності, безпеки та ефективності енергетичних систем, що має фундаментальне значення для забезпечення стабільної роботи енергетичної інфраструктури в умовах сучасних викликів.

Практична значущість роботи полягає в тому, що розроблений модуль дозволить забезпечити стабільну роботу енергоблоків шляхом

зменшення ймовірності аварій, оптимізації технічного обслуговування та зниження ризиків для персоналу. Впровадження автоматизованих систем моніторингу в реальних умовах сприятиме підвищенню ефективності експлуатації електростанцій та скороченню витрат на їх ремонт та обслуговування.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИЯВЛЕННЯ АВАРІЙНИХ ОЗНАК У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

1.1 Моніторинг технологічних процесів енергоблоків як ключовий елемент забезпечення надійності та безпеки електростанцій

Моніторинг технологічних процесів на енергоблоках є фундаментальною складовою системи забезпечення стабільної, надійної та безпечної експлуатації електростанцій. В умовах підвищених вимог до енергетичної безпеки, ефективності використання ресурсів та мінімізації техногенних ризиків роль систем моніторингу суттєво зростає. Саме вони забезпечують безперервне отримання, обробку та інтерпретацію інформації про стан обладнання і перебіг технологічних процесів, формуючи інформаційну основу для прийняття оперативних та стратегічних управлінських рішень [1-3].

Системи моніторингу дозволяють своєчасно ідентифікувати відхилення від нормативних режимів роботи, локалізувати потенційні джерела аварійних ситуацій, оптимізувати режими експлуатації обладнання, знижувати експлуатаційні витрати та подовжувати ресурс основних фондів енергоблоків. У цьому контексті моніторинг виступає не лише інструментом контролю, а й активним елементом управління техніко-економічною ефективністю та інформаційним потенціалом енергетичних підприємств [4-6].

1. Традиційні методи моніторингу технологічних процесів.

Традиційні системи моніторингу на енергоблоках ґрунтуються на безперервному або періодичному вимірюванні критично важливих фізичних, теплотехнічних та хімічних параметрів технологічного процесу. Основною метою таких систем є забезпечення дотримання встановлених регламентів роботи обладнання та запобігання виходу параметрів за допустимі межі.

До ключових контрольованих параметрів належать [7-9]:

Температурні показники.

Температура є одним із найбільш інформативних параметрів стану теплоенергетичного обладнання. Контроль температури робочого середовища в котлах, теплообмінниках, турбінах і системах охолодження дозволяє оцінювати ефективність теплообміну та виявляти деградаційні процеси, зокрема накипоутворення, забруднення поверхонь теплообміну або порушення циркуляції теплоносія. Підвищення температури охолоджувальної рідини турбін, наприклад, може свідчити про зниження коефіцієнта тепловіддачі та створювати передумови для прискореного зносу обладнання.

Тиск робочих середовищ.

Контроль тиску здійснюється в котлах, трубопроводах, парогенераторах, компресорних і турбінних установках. Відхилення тиску від нормативних значень є критичним індикатором порушень гідродинамічних і теплотехнічних режимів, таких як засмічення трубопроводів, нестабільність горіння палива або несправності запірної арматури. Зростання тиску в котлі може свідчити про погіршення відведення пари і становити безпосередню загрозу аварійної ситуації.

Витрати палива та частота обертання турбін.

Ці параметри використовуються для оцінки ефективності процесів спалювання палива, перетворення теплової енергії в механічну та електричну. Порушення оптимальних співвідношень між витратами палива та частотою обертання турбіни може свідчити про зниження ККД енергоблока, збої в роботі систем паливоподачі або механічні дефекти турбінного обладнання.

Зібрані дані передаються до автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), які здійснюють первинну обробку інформації, порівняння з пороговими значеннями та формування сигналів тривоги або автоматичних коригувальних впливів. Водночас традиційні

методи моніторингу, орієнтовані переважно на реактивне реагування, мають обмежені можливості щодо прогнозування відмов і виявлення прихованих дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

2. Сучасні інтелектуальні методи моніторингу та діагностики

Розвиток цифрових технологій, засобів обчислювальної техніки та інформаційних систем зумовив перехід від класичних методів контролю до інтелектуальних систем моніторингу, здатних забезпечувати глибокий аналіз технологічних процесів у реальному часі. Такі системи базуються на використанні математичного моделювання, методів машинного навчання, штучного інтелекту та технологій аналізу великих даних [10-12].

Моделювання та симуляція технологічних процесів

Застосування імітаційних та фізико-математичних моделей енергоблоків дозволяє формувати еталонні режими роботи та прогнозувати поведінку системи за різних умов експлуатації. Моделювання процесів теплообміну, гідродинаміки та горіння палива дає змогу виявляти відхилення, які ще не досягли порогових значень датчиків, але вже свідчать про початок деградаційних процесів. Таким чином забезпечується перехід від постфактум-контролю до превентивного управління.

Алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту.

Методи кластеризації, класифікації, нейронні мережі та алгоритми глибинного навчання дозволяють автоматично виявляти аномальні патерни в багатовимірних масивах даних. Інтелектуальні системи здатні ідентифікувати неочевидні взаємозв’язки між параметрами, що неможливо реалізувати за допомогою традиційних порогових підходів. Це підвищує чутливість моніторингу та точність діагностики технічного стану обладнання [13-15].

Технології аналізу великих даних (Big Data).

Сучасні енергоблоки оснащені тисячами датчиків, що генерують значні обсяги інформації з високою частотою оновлення. Інструменти Big Data дозволяють здійснювати комплексний аналіз історичних і потокових даних,

формувати прогностичні моделі та оцінювати ймовірність виникнення відмов. Це створює передумови для реалізації концепції прогнозного обслуговування (predictive maintenance), орієнтованої на зниження простоїв та оптимізацію витрат на ремонт.

Практичним прикладом реалізації інтелектуального моніторингу є впровадження систем прогнозування на основі даних, які дозволяють виявляти приховані тенденції в роботі турбінного обладнання. Зокрема, аналіз динаміки температури, вібрацій і тиску в системах мастила та охолодження дає змогу заздалегідь ідентифікувати потенційні несправності, зменшуючи ризик аварійних зупинок енергоблоків [1-18].

Таким чином, еволюція систем моніторингу від традиційних вимірювальних підходів до інтелектуальних цифрових рішень суттєво підвищує рівень технологічної безпеки, експлуатаційної надійності та економічної ефективності енергоблоків. У сучасних умовах саме інтеграція інтелектуальних методів моніторингу в систему управління інформаційним потенціалом енергетичних підприємств формує основу для забезпечення цифрової когерентності та сталого розвитку енергетичної галузі.

Розглянуто моніторинг технологічних процесів енергоблоків у системі забезпечення надійності, безпеки та цифрової трансформації енергетичних підприємств.

Сучасний розвиток енергетики характеризується зростанням складності технологічних процесів, підвищенням вимог до безпеки експлуатації енергоблоків, а також необхідністю забезпечення високого рівня економічної ефективності в умовах цифровізації. У цьому контексті моніторинг технологічних процесів виступає одним із ключових елементів системи управління енергетичними підприємствами, оскільки забезпечує формування достовірного інформаційного середовища для прийняття управлінських рішень на всіх рівнях [19, 20].

Моніторинг технологічних процесів енергоблоків доцільно розглядати як безперервний, багаторівневий процес збору, обробки, аналізу та

інтерпретації даних про стан обладнання і параметри технологічних режимів, спрямований на забезпечення стабільної, надійної та безпечної роботи електростанцій. Його функціональне призначення полягає не лише у фіксації поточного стану системи, а й у своєчасному виявленні відхилень, прогнозуванні розвитку небезпечних ситуацій та підтримці процесів оптимізації експлуатаційних режимів [21,22].

1. Функціональна роль моніторингу в управлінні енергоблоками

З позицій системного підходу моніторинг технологічних процесів є інформаційною основою функціонування автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), систем технічної діагностики та систем підтримки прийняття рішень. Його результати безпосередньо впливають на:

- рівень техногенної та інформаційної безпеки енергоблоків;
- показники експлуатаційної надійності основного та допоміжного обладнання;
- ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів;
- обґрунтованість управлінських рішень у коротко- та довгостроковій перспективі.

Особливістю енергетичних об’єктів є їхня висока інерційність та потенційна небезпека аварійних ситуацій, що зумовлює необхідність переходу від реактивного управління до превентивного, заснованого на прогнозних оцінках і аналізі тенденцій зміни параметрів.

2. Традиційні методи моніторингу технологічних процесів енергоблоків

Традиційні системи моніторингу на енергоблоках базуються на контролі ключових фізико-технічних та теплотехнічних параметрів, що визначають допустимі режими експлуатації обладнання. Їх головною метою є підтримка технологічних параметрів у межах встановлених нормативів і своєчасне реагування на критичні відхилення.

До базових контрольованих параметрів належать [23,24]:

Температурні параметри.

Температурний контроль використовується для оцінки стану теплообмінних поверхонь, котлоагрегатів, турбінного обладнання та систем охолодження. Зростання температури може свідчити про погіршення теплообміну, порушення циркуляції теплоносія, деградацію матеріалів або зношення окремих елементів. У довгостроковій перспективі такі відхилення призводять до прискореного старіння обладнання та зростання ризику аварій.

Тиск робочих середовищ.

Контроль тиску в котлах, паропроводах, трубопроводах та компресорних системах є критично важливим для забезпечення безпечної експлуатації. Відхилення тиску від номінальних значень можуть бути індикатором порушень гідродинамічних режимів, засмічення каналів, несправності регулювальної арматури або нестабільності процесів горіння.

Витрати палива та кінематичні параметри турбін.

Параметри витрат палива, частоти обертання турбін і навантаження генераторів використовуються для оцінки ефективності перетворення енергії. Їх аналіз дозволяє виявляти зниження коефіцієнта корисної дії енергоблоків та втрати, пов’язані з нераціональними режимами роботи.

Інформація з вимірювальних приладів передається до АСУ ТП, де здійснюється її порівняння з гранично допустимими значеннями. У разі перевищення порогів формуються сигнали тривоги або автоматично активуються коригувальні алгоритми. Разом з тим, традиційні методи моніторингу мають обмежену здатність до виявлення латентних дефектів і не забезпечують повноцінного прогнозування технічного стану [25,26].

3. Інтелектуальні методи моніторингу в умовах цифровізації енергетики

Розвиток інформаційних технологій зумовив формування нового покоління систем моніторингу, які поєднують класичні вимірювання з інтелектуальними методами аналізу даних. Такі системи орієнтовані на

підвищення інформативності, адаптивності та прогностичних можливостей управління.

Математичне моделювання та імітація процесів.

Використання математичних моделей дозволяє формувати цифрові аналоги технологічних процесів, які відображають закономірності теплообміну, гідродинаміки та енергетичних перетворень. Порівняння реальних параметрів із модельними значеннями дає змогу виявляти початкові стадії відхилень, ще до досягнення аварійних рівнів.

Методи машинного навчання та штучного інтелекту.

Інтелектуальні алгоритми забезпечують аналіз багатовимірних потоків даних, виявлення аномалій, класифікацію режимів роботи та ідентифікацію прихованих залежностей між параметрами. Це дозволяє підвищити точність діагностики та знизити ймовірність хибних спрацювань.

Аналітика великих даних.

Застосування технологій Big Data забезпечує обробку великих масивів історичної та поточної інформації, накопиченої в процесі експлуатації енергоблоків. На основі таких даних формуються прогностичні моделі, які дозволяють оцінювати ймовірність відмов, оптимізувати графіки технічного обслуговування та реалізовувати концепцію прогнозного управління.

Практична реалізація інтелектуальних систем моніторингу дозволяє виявляти деградаційні процеси в турбінному обладнанні, системах мастила та охолодження, паливоподачі та теплообміну задовго до виникнення аварійних ситуацій [27].

4. Моніторинг як складова інформаційного потенціалу енергетичних підприємств

У контексті даного дослідження моніторинг технологічних процесів доцільно розглядати як ключовий елемент формування та реалізації інформаційного потенціалу енергетичних підприємств. Якість, повнота та достовірність моніторингових даних визначають рівень інформаційної

підтримки управління, ступінь цифрової когерентності та ефективність інтеграції окремих підсистем управління.

Інтелектуальний моніторинг забезпечує перехід від фрагментарного контролю параметрів до системного управління знаннями про стан енергоблока, що створює передумови для підвищення стійкості, безпеки та конкурентоспроможності підприємств енергетичної галузі [28].

Таким чином, моніторинг технологічних процесів енергоблоків еволюціонує від традиційних вимірювальних підходів до комплексних інтелектуальних систем, здатних забезпечувати превентивне управління, прогнозування відмов і оптимізацію режимів експлуатації. У сучасних умовах цифрової трансформації саме інтеграція інтелектуального моніторингу в систему управління інформаційним потенціалом формує методологічну основу забезпечення надійності, безпеки та сталого розвитку енергетичних підприємств.

1.2 Моніторинг технологічних процесів теплових електростанцій у системі забезпечення надійності, безпеки та ефективності експлуатації енергоблоків

Функціонування теплових електростанцій (ТЕС) характеризується складною сукупністю взаємопов'язаних теплотехнічних, гідродинамічних, хімічних та механічних процесів, що реалізуються в умовах високих температур і тисків. За таких умов моніторинг технологічних процесів набуває визначального значення як інструмент забезпечення безпечної експлуатації енергоблоків, підвищення їх надійності та досягнення оптимальних техніко-економічних показників.

Особливістю більшості теплових електростанцій України є значний рівень фізичного та морального зношення основного обладнання, що обумовлює підвищену ймовірність прихованих дефектів, нестійких режимів роботи та аварійних ситуацій. У цих умовах моніторинг технологічних

процесів виступає не лише засобом контролю, а й ключовим елементом інформаційного забезпечення управління життєвим циклом енергоблоків ТЕС.

1. Функціональне призначення моніторингу на теплових електростанціях

З позицій системного підходу моніторинг технологічних процесів ТЕС є інтегрованою складовою автоматизованих систем управління технологічними процесами, систем технічної діагностики та експлуатаційного управління. Його основними функціями є:

- забезпечення безпечних режимів роботи котло-турбінного обладнання;
- своєчасне виявлення відхилень параметрів теплоенергетичного циклу;
- запобігання розвитку передаварійних і аварійних станів;
- оптимізація паливовикористання та зниження питомих витрат;
- формування інформаційної бази для прогнозування технічного стану обладнання.

Моніторинг на ТЕС орієнтований на контроль як стаціонарних, так і перехідних режимів роботи, які супроводжуються підвищеними термомеханічними навантаженнями на елементи котлів, турбін і трубопроводів.

2. Традиційні методи моніторингу технологічних процесів ТЕС

Традиційні системи моніторингу теплових електростанцій базуються на контролі ключових параметрів пароводяного та паливного циклів, що визначають безпеку та ефективність роботи енергоблока.

Моніторинг температурних режимів.

На ТЕС контроль температури здійснюється в зонах спалювання палива, поверхнях нагріву котлів, пароперегрівачах, турбінних ступенях і конденсаторах. Порушення температурних режимів може свідчити про неефективне горіння палива, забруднення поверхонь теплообміну,

порушення циркуляції води або деградацію металу. Тривала робота в умовах підвищених температур призводить до прискореного повзучого руйнування та зниження ресурсу обладнання.

Контроль тиску та витрат пари і води.

Тиск пари в котлах і паропроводах є одним із ключових показників стабільності теплотехнічного циклу ТЕС. Відхилення тиску від номінальних значень можуть бути наслідком нестабільного горіння, гідравлічних втрат, витоків або несправності регулювальної арматури. Аналіз витрат води та пари дозволяє виявляти нераціональні режими експлуатації та внутрішні втрати енергії.

Моніторинг паливоподачі та процесів горіння.

Контроль витрат палива, співвідношення «паливо–повітря» та параметрів факела горіння є критичним для забезпечення високого коефіцієнта корисної дії котлоагрегатів. Порушення цих параметрів призводить до зростання питомих витрат палива, утворення шлаків і золи, а також підвищення екологічного навантаження.

Дані з вимірювальних засобів надходять до АСУ ТП, де здійснюється порівняння з регламентними значеннями та реалізується алгоритм реактивного управління. Разом із тим, традиційні підходи не забезпечують достатнього рівня прогнозування деградаційних процесів.

3. Інтелектуальні методи моніторингу технологічних процесів ТЕС

Цифровізація теплової енергетики зумовлює впровадження інтелектуальних систем моніторингу, які дозволяють перейти від контролю граничних значень до аналізу закономірностей функціонування енергоблоків.

Моделювання котло-турбінного циклу.

Застосування математичних моделей теплових схем ТЕС дозволяє формувати еталонні режими роботи та виявляти відхилення у процесах теплообміну, пароутворення та конденсації. Порівняння фактичних і модельних параметрів дає змогу діагностувати початкові стадії деградації поверхонь нагріву та трубопроводів.

Застосування алгоритмів машинного навчання.

Методи машинного навчання дозволяють аналізувати багатовимірні потоки даних з датчиків температури, тиску, вібрацій та складу газів. Інтелектуальні алгоритми виявляють аномальні режими роботи котлів і турбін, що не фіксуються традиційними пороговими методами.

Аналітика великих даних і прогнозне обслуговування. На основі накопичених експлуатаційних даних формуються прогностичні моделі, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс обладнання, оптимізувати графіки ремонтів і знижувати кількість аварійних зупинок енергоблоків ТЕС.

4. Моніторинг ТЕС як елемент формування інформаційного потенціалу.

У межах дисертаційного дослідження моніторинг технологічних процесів ТЕС розглядається як ключовий компонент інформаційного потенціалу підприємства. Саме якість, повнота та інтегрованість моніторингових даних визначають можливості реалізації цифрової когерентності між технічними, інформаційними та управлінськими підсистемами теплової електростанції.

Інтелектуальні системи моніторингу забезпечують перехід від фрагментарного контролю до цілісного управління знаннями про стан енергоблоків, що є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності ТЕС в умовах енергетичного переходу та зростання вимог до екологічної й економічної ефективності. Моніторинг технологічних процесів теплових електростанцій є критично важливим інструментом забезпечення безпеки, надійності та ефективності експлуатації енергоблоків. Перехід від традиційних методів контролю до інтелектуальних цифрових систем дозволяє своєчасно виявляти деградаційні процеси, знижувати ризики аварій та формувати основу для реалізації концепції цифрової когерентності в управлінні інформаційним потенціалом ТЕС.

1.3 Моніторинг технологічних процесів атомних електростанцій у системі забезпечення ядерної, техногенної та інформаційної безпеки

Атомні електростанції (АЕС) є складними техногенними об'єктами підвищеної небезпеки, функціонування яких пов'язане з використанням ядерної енергії та необхідністю безумовного дотримання принципу глибокоешелонованого захисту. За таких умов моніторинг технологічних процесів набуває статусу системоутворювального елемента управління, що забезпечує ядерну, радіаційну та техногенну безпеку, а також стабільність і ефективність експлуатації енергоблоків.

Особливістю АЕС є багаторівнева структура систем безпеки, жорстко регламентовані режими роботи та підвищені вимоги до достовірності й оперативності інформації. Тому моніторинг технологічних процесів на АЕС розглядається не лише як технічна функція контролю параметрів, а як інтегрований механізм формування інформаційного потенціалу, що забезпечує підтримку управлінських рішень у нормальних, перехідних, передаварійних та аварійних режимах.

1. Функціональне призначення моніторингу технологічних процесів на АЕС

З позицій системного аналізу моніторинг на АЕС є інформаційною основою функціонування автоматизованих систем управління технологічними процесами, систем безпеки, аварійного захисту та підтримки операторських рішень. Його ключовими функціями є:

- забезпечення контрольованості ядерно-фізичних, теплогідравлічних і радіаційних процесів;
- своєчасне виявлення відхилень від проектних та ліцензійних параметрів;
- підтримка реалізації принципів глибокоешелонованого захисту;
- запобігання розвитку передаварійних і аварійних ситуацій;

- формування достовірної інформаційної бази для аналізу безпеки та оптимізації експлуатації.

Моніторинг на АЕС охоплює як внутрішні параметри активної зони та першого контуру, так і параметри систем безпеки, що забезпечують цілісність фізичних бар'єрів на шляху поширення іонізуючого випромінювання.

2. Традиційні методи моніторингу технологічних процесів АЕС

Традиційні системи моніторингу АЕС ґрунтуються на безперервному вимірюванні та контролі параметрів, які безпосередньо визначають безпечний стан реакторної установки та допоміжних систем.

Контроль ядерно-фізичних параметрів.

До ключових параметрів належать потужність реактора, нейтронний потік, коефіцієнти реактивності та розподіл потужності в активній зоні. Моніторинг цих показників дозволяє забезпечити керованість ланцюгової ядерної реакції та запобігти переходу реактора в небезпечні режими.

Моніторинг теплогідравлічних параметрів першого контуру.

Контролюються температура і тиск теплоносія, витрати в головних циркуляційних контурах, стан парогенераторів. Відхилення цих параметрів можуть свідчити про порушення теплообміну, втрату герметичності або деградацію обладнання, що безпосередньо впливає на ядерну безпеку.

Радіаційний контроль.

Радіаційний моніторинг забезпечує контроль рівнів іонізуючого випромінювання в приміщеннях, на майданчику АЕС та за його межами. Він є обов'язковим елементом системи безпеки і дозволяє оперативно виявляти порушення цілісності бар'єрів локалізації радіоактивних речовин.

Контроль систем безпеки та аварійного захисту.

Параметри готовності та працездатності систем аварійного охолодження активної зони, систем електроживлення, локалізуючих і захисних систем постійно контролюються з метою гарантування їх негайного спрацювання у разі необхідності.

Традиційні методи моніторингу на АЕС базуються на пороговому принципі та суворих регламентних вимогах, однак їх можливості щодо прогнозування деградаційних процесів є обмеженими.

3. Інтелектуальні методи моніторингу в системах управління АЕС

Сучасний етап розвитку атомної енергетики характеризується активним впровадженням інтелектуальних інформаційних технологій, спрямованих на підвищення рівня безпеки та надійності експлуатації АЕС.

Математичне моделювання та віртуальна симуляція реакторних процесів.

Комп'ютерні моделі активної зони, теплогідравлічних процесів і систем безпеки дозволяють формувати цифрові аналоги експлуатаційних режимів АЕС. Порівняння фактичних даних із результатами моделювання забезпечує виявлення прихованих відхилень та підвищує ефективність діагностики.

Методи машинного навчання та підтримки операторських рішень.

Алгоритми штучного інтелекту використовуються для аналізу багатовимірних потоків даних, прогнозування розвитку подій у передаварійних режимах та зниження інформаційного навантаження на оперативний персонал. Це особливо важливо в умовах швидкоплинних перехідних процесів.

Аналітика великих даних і прогнозування надійності.

Накопичення великих масивів експлуатаційних і діагностичних даних створює можливості для прогнозування залишкового ресурсу обладнання, оптимізації планово-попереджувальних ремонтів і підвищення ефективності управління життєвим циклом АЕС.

4. Моніторинг АЕС як елемент формування інформаційного потенціалу та цифрової когерентності

У межах дисертаційного дослідження моніторинг технологічних процесів АЕС розглядається як ключовий компонент інформаційного

потенціалу, що забезпечує узгодженість між технічними, інформаційними та управлінськими підсистемами атомної електростанції.

Інтеграція інтелектуальних систем моніторингу створює умови для підвищення цифрової когерентності, що проявляється у здатності системи управління адекватно та своєчасно реагувати на зміни стану об'єкта, забезпечуючи пріоритет безпеки над економічними показниками.

Моніторинг технологічних процесів атомних електростанцій є визначальним чинником забезпечення ядерної та радіаційної безпеки, надійності експлуатації та ефективності управління енергоблоками. Перехід від традиційних регламентних методів контролю до інтелектуальних цифрових систем моніторингу дозволяє підвищити рівень превентивності управління, знизити ризики розвитку аварійних сценаріїв та сформувати методологічну основу для розвитку інформаційного потенціалу АЕС в умовах цифрової трансформації.

1.4. Структурна схема інтегрованої системи моніторингу атомної електростанції

Інтегрована система моніторингу АЕС являє собою багаторівневу ієрархічну інформаційно-аналітичну систему (рис. 1.1.), що забезпечує безперервний контроль, аналіз, прогнозування та підтримку управлінських рішень щодо ядерно-фізичних, теплогідравлічних, радіаційних і технічних процесів енергоблока з дотриманням принципів глибокоешелонованого захисту.

1. Рівень первинного вимірювання (сенсорний рівень)

Функціональне призначення: Безпосередній контроль фізичних, ядерно-фізичних і радіаційних параметрів.

Основні підсистеми:

- датчики нейтронного потоку та потужності реактора;

- датчики температури та тиску теплоносія першого і другого контурів;
- витратоміри теплоносія;
- датчики рівня та стану парогенераторів;
- системи радіаційного контролю (внутрішній і зовнішній);
- датчики вібрацій, деформацій та механічних навантажень;
- системи контролю стану бар'єрів безпеки.

Результат:

Формування первинних потоків технологічної та радіаційної інформації в реальному часі.

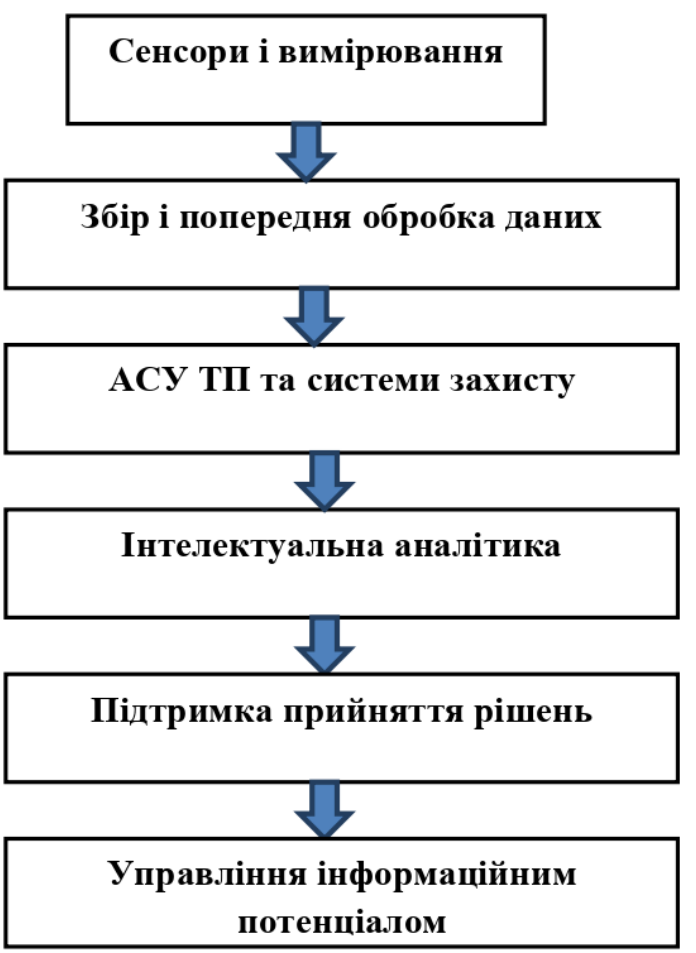

Рис. 1.1. Структурна схема інтегрованої системи моніторингу технологічних процесів атомної електростанції

2. Рівень збору та попередньої обробки даних

Функціональне призначення: Агрегація, синхронізація та первинна валідація вимірювальних даних.

Основні елементи:

- контролери збору даних;
- модулі фільтрації шумів і виявлення некоректних сигналів;
- системи часової синхронізації;
- резервовані канали передачі даних.

Результат:

Підготовлені, стандартизовані та достовірні масиви даних для подальшого аналізу.

3. Рівень автоматизованого контролю та захисту

Функціональне призначення: Реалізація регламентних алгоритмів контролю та аварійного реагування.

Основні підсистеми:

- автоматизована система управління технологічними процесами (АСУ ТП);
- система аварійного захисту реактора;
- системи безпеки та локалізації аварій;
- системи контролю працездатності захисних бар’єрів.

Результат:

Автоматичне утримання параметрів у межах допустимих значень та негайне реагування на критичні відхилення.

4. Рівень аналітики та інтелектуального моніторингу

Функціональне призначення:

Поглиблений аналіз стану енергоблока та прогнозування розвитку подій.

Основні компоненти:

- математичні моделі реакторних і теплогідравлічних процесів;
- модулі машинного навчання та штучного інтелекту;

- системи виявлення аномалій і деградаційних процесів;
- прогностичні моделі залишкового ресурсу обладнання.

Результат:

Формування прогнозів, сценаріїв розвитку подій та ранніх попереджень про потенційні загрози.

5. Рівень підтримки прийняття рішень

Функціональне призначення:

Інформаційна підтримка оперативного персоналу та інженерно-технічних служб.

Основні елементи:

- інтегровані панелі оператора;
- інтерфейси візуалізації стану бар'єрів безпеки;
- сценарні рекомендації дій персоналу;
- системи аналізу передаварійних ситуацій.

Результат:

Зниження інформаційного навантаження на персонал і підвищення обґрунтованості управлінських рішень.

6. Рівень управління інформаційним потенціалом і цифрової когерентності

Функціональне призначення:

Забезпечення узгодженості, цілісності та надійності інформаційного середовища АЕС.

Основні функції:

- інтеграція технологічних, діагностичних і управлінських даних;
- управління доступом і кібербезпекою;
- архівування та аналіз історичних даних;
- забезпечення відповідності вимогам ядерного регулювання.

Результат:

Формування цілісного інформаційного простору АЕС та реалізація цифрової когерентності систем управління.

Наукова новизна: Запропонована структурна схема, на відміну від традиційних, інтегрує рівень інтелектуальної аналітики та управління інформаційним потенціалом, що забезпечує перехід від регламентного контролю параметрів до превентивного управління безпекою АЕС в умовах цифрової трансформації.

1.5 Сучасні інформаційні та програмні технології для виявлення аномалій на енергоблоках

У сучасних умовах для забезпечення стабільної та безпечної роботи енергоблоків на електростанціях необхідно використовувати високотехнологічні системи моніторингу, діагностики та виявлення аномальних подій. Одним із важливих аспектів таких систем є здатність до виявлення аномалій у технологічних процесах. Застосування сучасних інформаційних і програмних технологій для цієї мети дозволяє значно підвищити ефективність, надійність та безпеку роботи енергоблоків.

1. Інформаційні технології для виявлення аномалій. Інформаційні технології (ІТ) для виявлення аномалій передбачають використання різноманітних інструментів і підходів для збору, зберігання, обробки та аналізу даних, отриманих з технологічних процесів на енергоблоках. Вони можуть включати:

Системи збору і зберігання даних: Для виявлення аномалій важливо мати точні і своєчасно зібрані дані про різні параметри роботи енергоблока (температура, тиск, потужність, швидкість обертання турбін, витрата пального тощо). Інформація може збиратися за допомогою SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition), систем автоматизації та контролю, а також спеціалізованих датчиків, що фіксують ключові показники процесу.

Бази даних та хмарні технології: Велика кількість даних, що збираються, потребує ефективного зберігання та обробки. Хмарні обчислення дозволяють розподіляти обробку даних, знижуючи навантаження на локальні системи. Хмарні платформи можуть використовуватися для

аналізу великих обсягів інформації (Big Data) і надання швидких результатів, які забезпечують точність виявлення аномалій на основі аналізу історичних та поточних даних.

Моделювання та симуляція технологічних процесів: За допомогою інформаційних технологій можна створювати моделі технологічних процесів, що дозволяє виявляти відхилення від нормальної роботи енергоблока. Такі моделі допомагають симулювати різні сценарії аварій і аномалій, що дозволяє розробити оптимальні стратегії реагування.

2. Програмні технології для виявлення аномалій. Програмні технології займають ключову роль у виявленні аномальних подій на енергоблоках. Вони включають різноманітні алгоритми та методи для обробки даних та виявлення відхилень від нормальних параметрів роботи. Сучасні підходи в основному базуються на використанні алгоритмів машинного навчання, штучного інтелекту та статистичних методів. Ось кілька основних напрямків програмних технологій:

Аналіз великих даних: Одним з основних напрямків у виявленні аномалій є використання технологій Big Data для обробки величезних обсягів даних, що генеруються системами моніторингу. Алгоритми машинного навчання дозволяють аналізувати ці дані в реальному часі, визначати патерни та виявляти аномалії, що можуть свідчити про можливі аварії чи збої в роботі обладнання.

Нейронні мережі: Глибоке навчання та нейронні мережі дозволяють ефективно виявляти складні закономірності в технологічних процесах. Завдяки своїй здатності до самонавчання, ці системи можуть адаптуватися до нових умов і підвищувати точність виявлення аномалій із часом.

Методи класифікації та кластеризації: Алгоритми класифікації дозволяють розпізнавати типи аномалій за допомогою визначення різних класів на основі ознак технологічного процесу. Кластеризація допомагає групувати подібні випадки, що дозволяє швидше знаходити потенційно

небезпечні ситуації. Наприклад, можна використовувати методи K-середніх або DBSCAN для аналізу даних і пошуку груп аномальних патернів.

Аномалія в часі та простору: Методології, що використовують часові ряди та просторові дані, дозволяють виявляти аномалії, пов'язані з певними часовими інтервалами чи певними частинами електростанції, що можуть бути ознаками потенційних проблем.

Методи статистичного контролю якості: Статистичний контроль якості використовує показники, такі як середнє значення, дисперсія та стандартне відхилення, для моніторингу відхилень від нормальних значень в технологічних параметрах. Якщо значення виходять за межі допустимих норм (обумовлених контрольними картами), це може сигналізувати про аномалію.

Тести гіпотез: Статистичні тести дозволяють перевіряти гіпотези щодо нормальності розподілу даних, на основі яких можна виявити аномальні ситуації. Наприклад, перевірка на нормальність за допомогою тестів Шапіро-Уілка або Колмогорова-Смірнова може допомогти виявити нетипові патерни у процесах.

Метод головних компонент (PCA): PCA є популярним методом для зменшення розмірності та виявлення аномалій в даних з багатьма параметрами. За допомогою PCA можна зменшити кількість змінних, які впливають на процес, і зосередитись на основних компонентах, що допомагають виявляти аномальні значення.

Візуалізація даних є потужним інструментом для виявлення аномалій, оскільки дає можливість наочно побачити відхилення у графіках та діаграмах. Системи візуалізації допомагають операторам і інженерам оперативно виявляти аномалії в даних, що дозволяє швидко реагувати на можливі проблеми.

Інтерактивні панелі): Використання інтерактивних панелей для моніторингу в реальному часі дозволяє не тільки збирати дані з різних джерел, а й наочно відображати аномалії, що з’являються.

Графічні методи: Наприклад, heat maps (теплові карти) або діаграми «ящик з вусами» (box plots) можуть ефективно показувати аномальні відхилення в даних.

Сучасні системи виявлення аномалій повинні бути інтегровані з існуючими автоматизованими системами управління, такими як SCADA-системи або системи диспетчеризації. Це дозволяє забезпечити зворотний зв'язок між виявленими аномаліями і прийняттям оперативних рішень для запобігання аварійним ситуаціям.

3. Прогнози та перспективи розвитку. У найближчому майбутньому виявлення аномалій на енергоблоках буде значно покращене завдяки розвитку технологій штучного інтелекту, машинного навчання та великих даних. Очікується, що: Автоматизація та адаптивні алгоритми дозволять системам не лише виявляти аномалії, але й прогнозувати їх на основі попереднього досвіду.

Інтелектуальні сенсори стануть більш точними та чутливими, що дозволить системам отримувати ще більш точні дані для аналізу.

Інтеграція з Інтернетом Речей (IoT) і розвиток 5G та інших комунікаційних технологій зроблять можливим виявлення аномалій на базі даних з мільйонів сенсорів в реальному часі з максимальною точністю.

Таким чином, сучасні програмні та інформаційні технології для виявлення аномалій є основою для підвищення надійності, безпеки і економічної ефективності роботи енергоблоків на електростанціях.

Сучасні системи моніторингу та виявлення аномалій на енергоблоках стають значно більш ефективними завдяки розвитку Інтернету Речей (IoT) та технологій 5G. Ці технології дозволяють значно розширити можливості збору даних, обробки та передачі інформації в реальному часі, що є критично важливим для своєчасного виявлення аварійних ситуацій та аномалій.

Інтернет Речей дозволяє підключати величезну кількість різноманітних датчиків, сенсорів та пристроїв до єдиної мережі, забезпечуючи безперервний моніторинг і збір даних з різних точок енергоблока. Кожен

сенсор може вимірювати певний параметр (температура, тиск, вібрації, рівень пального, швидкість обертання турбін тощо), що дає змогу створювати точні й актуальні моделі роботи енергоблока.

Основні переваги використання IoT для виявлення аномалій:

Великий обсяг даних: Мережа сенсорів дозволяє збирати величезну кількість параметрів у реальному часі. Прогнозування аварій: Моделі машинного навчання можуть бути інтегровані з IoT-системами для прогнозування аномалій на основі зібраних даних. Своєчасне реагування: Всі сенсори, підключені до єдиної мережі, дозволяють передавати дані до центральної системи моніторингу, що дозволяє швидко виявляти і реагувати на потенційні аномалії.

Широке покриття: Можливість підключення великої кількості пристроїв на великій площі, що робить можливим моніторинг кожного аспекту роботи енергоблока.

Зменшення втрат даних: Висока надійність 5G забезпечує безперервний потік даних без втрат, що дозволяє точніше оцінювати роботу енергоблока і вчасно виявляти аномалії.

У сучасних системах моніторингу для виявлення аномалій використовуються складні алгоритми, які дозволяють не тільки виявляти відхилення від нормальних параметрів, а й робити це в реальному часі. Це забезпечує високу ефективність системи та дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози.

Алгоритми на основі аналізу часових рядів: Один із найбільш поширених підходів до виявлення аномалій у реальному часі — це використання алгоритмів для аналізу часових рядів даних. Наприклад, для моніторингу параметрів роботи енергоблока можуть використовуватися методи автокореляції або аналіз спектрів частот, що дозволяють виявити відхилення в патернах зміни параметрів протягом часу.

Методи на основі статистичних порогів: Статистичні методи включають встановлення порогових значень для різних параметрів, при

перевищенні яких система спрацьовує і повідомляє про аномалію. Це можуть бути прості методи на основі стандартного відхилення, а також більш складні методи з використанням квантильних функцій або багатовимірних порогів для комплексного оцінювання.

Сучасні системи також часто використовують гібридні моделі, які поєднують статистичні методи та машинне навчання для більш точної оцінки ситуації. Наприклад, можна комбінувати моделі для оцінки трендів з нейронними мережами, що дозволяє не лише виявляти відхилення, а й прогнозувати їх розвиток у майбутньому.

Гібридні моделі на основі SVM та нейронних мереж: Support Vector Machines (SVM) можуть використовуватися для класифікації нормальних і аномальних ситуацій, а нейронні мережі дозволяють уточнювати ці прогнози на основі історичних даних.

Проблеми та виклики у впровадженні систем виявлення аномалій. Попри всі переваги сучасних інформаційних і програмних технологій, існує ряд проблем і викликів, з якими стикаються електростанції при впровадженні таких систем:

Висока вартість впровадження: Встановлення великої кількості датчиків та сенсорів, інтеграція нових технологій з існуючими системами часто потребує значних фінансових витрат.

Необхідність у висококваліфікованих фахівцях: Для налаштування та обслуговування таких складних систем потрібні фахівці з високими технічними знаннями в галузі IT, машинного навчання та автоматизації.

Сумісність з існуючими системами: Інтеграція нових систем виявлення аномалій з уже наявними моніторинговими та автоматизованими системами електростанцій може бути складною та вимагати адаптації.

Безпека даних: Зі збільшенням кількості пристроїв, підключених до мережі, та обробки великих обсягів інформації виникають нові загрози для безпеки даних і захисту конфіденційності.

Перспективи розвитку технологій виявлення аномалій. У майбутньому очікується значний розвиток технологій виявлення аномалій у сфері енергетики. Це включає:

Розвиток квантових обчислень, які можуть забезпечити ще швидшу та точнішу обробку даних.

Інтелектуальні системи на базі штучного інтелекту (AI), які будуть не тільки виявляти аномалії, але й прогнозувати та автоматично коригувати параметри процесу.

Подальша інтеграція з технологіями блокчейн, що дозволить забезпечити прозорість і безпеку обміну даними між різними системами моніторингу.

Загалом, розвиток інформаційних і програмних технологій для виявлення аномалій на енергоблоках відкриває нові можливості для підвищення ефективності, надійності та безпеки енергетичних об'єктів, дозволяючи своєчасно виявляти загрози і запобігати аваріям.

Інтеграція новітніх технологій для комплексної безпеки енергоблоків. Незважаючи на значний прогрес у впровадженні інформаційних і програмних технологій для виявлення аномалій, проблема комплексної безпеки на енергоблоках залишається актуальною. Для досягнення високої ефективності виявлення аварійних ознак необхідно інтегрувати різні технології в єдину систему, що дозволяє ефективно реагувати на всі типи загроз.

Інтеграція з системами прогнозування та попередження аварій. Одним з важливих напрямків для майбутнього розвитку є інтеграція систем виявлення аномалій з прогнозуючими системами та системами попередження аварій. Використання алгоритмів глибокого навчання, які базуються на великій кількості історичних даних, дозволяє не лише виявляти існуючі аномалії, а й прогнозувати їх появу в майбутньому. Це дає змогу здійснювати превентивне обслуговування, визначати й усувати потенційні загрози ще до того, як вони переростуть в серйозні проблеми.

Моделі прогнозування аварій можуть базуватися на таких принципах:

Моделювання за допомогою штучних нейронних мереж: використання нейронних мереж для створення моделей, які прогнозують аварійні ситуації на основі великої кількості вхідних даних (температура, тиск, навантаження, вібрація, тощо).

Аналіз великих даних (Big Data): зібрані дані можуть бути використані для створення точних прогнозів, аналізуючи поведінку енергоблока за тривалий період часу.

Інтеграція систем виявлення аномалій з автоматизованими системами управління дозволяє створювати високошвидкісні механізми реагування в реальному часі. Це включає не тільки виявлення аномалії, а й автоматичне коригування параметрів роботи енергоблока, таких як:

Автоматичне коригування швидкості обертання турбін.

Управління подачею пального.

Регулювання роботи систем охолодження та інших критичних систем.

Автоматичне реагування на аномалії не тільки зменшує ймовірність аварій, але й підвищує ефективність роботи енергоблока, знижуючи потребу в людському втручанні та помилках, що можуть виникнути внаслідок недосвідченості або людського фактора.

Оскільки енергоблоки стають дедалі більш інтегрованими в цифрові та IoT-мережі, проблема безпеки даних та кіберзахисту виходить на передній план. Нападники можуть використати виявлені аномалії для маніпулювання даними або навіть для серйозних кібератак на критичні енергетичні інфраструктури.

Для забезпечення безпеки та захисту інформації від кібератак, в системах виявлення аномалій можуть бути реалізовані:

Шифрування даних для запобігання несанкціонованому доступу до важливих параметрів роботи енергоблока.

Мультирівневі системи аутентифікації та контролю доступу для обмеження прав на доступ до конфіденційних даних.

Моніторинг і виявлення аномалій в мережах для своєчасного виявлення кіберзагроз.

Таким чином, захист від кіберзагроз в рамках систем виявлення аномалій є не менш важливим завданням, оскільки помилки або збої в системах безпеки можуть призвести до серйозних наслідків, включаючи навіть пошкодження обладнання чи зупинку енергоблока.

Технології на основі блокчейн для підвищення прозорості та довіри. Система виявлення аномалій може бути вдосконалена за рахунок впровадження блокчейн-технологій, що дає змогу підвищити прозорість процесів і забезпечити невід'ємність і незмінність даних. Завдяки блокчейну кожен етап обробки даних буде чітко зафіксований і неможливо змінити чи маніпулювати ним.

Переваги блокчейн-технологій у контексті моніторингу енергоблоків:

Прозорість та аудит: Записи про всі події та зміни параметрів енергоблока будуть доступні для аудиту, що дозволить легше відслідковувати потенційні аномалії та їх причинно-наслідкові зв'язки. Захист від маніпуляцій: Даний підхід гарантує, що дані про роботу енергоблока не можуть бути змінені або сфальсифіковані після того, як вони потрапили в систему, що знижує ризик кібератак або внутрішніх маніпуляцій. Застосування блокчейн-технології в системах виявлення аномалій може значно збільшити рівень довіри до системи та забезпечити її стійкість до зовнішніх і внутрішніх загроз.

Виклики та перспективи розвитку виявлення аномалій у реальному часі. Попри безперечний прогрес у використанні сучасних інформаційних і програмних технологій для виявлення аномалій, є кілька викликів, які потребують додаткових досліджень і вдосконалень. Серед них можна виділити: Необхідність адаптації алгоритмів до нових умов: Для ефективного виявлення аномалій необхідно постійно вдосконалювати алгоритми з урахуванням змін в енергетичній інфраструктурі та нових технологічних умов.

Проблема фальшивих спрацьовувань: Важливим аспектом є мінімізація кількості хибних тривог — коли система виявляє аномалії, які не є реальною загрозою. Це може призвести до зниження ефективності системи та створити зайве навантаження на персонал.

Прогнозування в умовах невизначеності: На сьогоднішній день багато моделей, що використовуються для прогнозування аномалій, не враховують усіх можливих сценаріїв, пов'язаних з непередбачуваними змінами у роботі енергоблока. Розробка нових методів, які зможуть адаптуватися до таких умов, стане важливою частиною майбутніх досліджень.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

У першому розділі магістреської роботи було проведено аналіз розвитку технологій моніторингу та автоматизованих систем виявлення аварійних ознак на електростанціях є важливим етапом в забезпеченні безпеки та ефективності експлуатації енергоблоків. Сучасні методи, такі як використання інтелектуальних систем на базі штучного інтелекту, аналіз великих даних, інтернету речей (IoT) та технологій доповненої реальності, дозволяють значно підвищити точність і своєчасність виявлення аномальних подій, що може запобігти серйозним аваріям та знизити ризики для безпеки працівників.

Інтеграція автоматизованих систем у технологічні процеси енергоблоків дозволяє не тільки забезпечити їх стабільну роботу, але й суттєво покращити процеси технічного обслуговування, знизити витрати на ремонтні роботи та забезпечити безперервне виробництво енергії.

Перспективи розвитку:Розвиток алгоритмів глибокого навчання та адаптивних систем дозволить знижувати ймовірність фальшивих тривог та покращити точність виявлення реальних аномалій.

Автоматизовані рішення на основі ШІ можуть зменшити час реагування на аномалії та покращити загальну ефективність роботи енергоблоків.

Інтеграція з іншими технологіями, такими як Augmented Reality (AR), для візуалізації аномалій і підтримки прийняття рішень в реальному часі.

Сучасні інформаційні та програмні технології для виявлення аномалій мають величезний потенціал для підвищення безпеки та ефективності енергоблоків. Впровадження таких систем дозволяє значно знизити ймовірність аварій і забезпечити оперативне реагування на будь-які відхилення в технологічних процесах.

Прогнозування майбутніх аномалій, автоматичне реагування на них і захист від кіберзагроз є ключовими аспектами розвитку систем виявлення аномалій в енергетичній галузі.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Поняття сучасної автоматизованої системи безперервного моніторингу

У сучасних умовах ускладнення технологічних процесів, зростання вимог до безпеки експлуатації об’єктів підвищеної небезпеки та інтенсифікації цифрової трансформації промисловості особливої актуальності набуває впровадження автоматизованих систем безперервного моніторингу. Такі системи є ключовим інструментом забезпечення стабільності функціонування складних технічних об’єктів, зокрема енергетичних підприємств, та формують інформаційну основу превентивного управління ризиками.

Автоматизована система безперервного моніторингу (АСБМ) розглядається як інтегрований інформаційно-технічний комплекс, призначений для постійного збору, обробки, аналізу та інтерпретації даних про стан технологічних процесів, обладнання та середовища функціонування об’єкта з метою забезпечення безпеки, надійності та ефективності управління.

Історично системи моніторингу розвивалися від локальних засобів вимірювання та періодичного контролю до багаторівневих автоматизованих комплексів, інтегрованих в загальну систему управління підприємством. Початкові форми моніторингу мали переважно реактивний характер і були орієнтовані на фіксацію перевищення гранично допустимих параметрів.

Подальший розвиток автоматизації, мікропроцесорної техніки та інформаційних технологій зумовив перехід до безперервного моніторингу, який передбачає постійне відстеження динаміки параметрів у реальному часі.

На сучасному етапі безперервний моніторинг трансформується в інтелектуальну систему, здатну не лише реєструвати відхилення, а й прогнозувати розвиток небезпечних процесів та формувати аналітичну підтримку управлінських рішень.

З позицій системного підходу автоматизована система безперервного моніторингу характеризується такими базовими ознаками:

- безперервність функціонування, що забезпечує постійне оновлення інформації про стан об’єкта;
- автоматизованість, яка мінімізує вплив людського фактора на процеси збору та первинної обробки даних;
- інтегрованість, що полягає у взаємодії з автоматизованими системами управління, захисту та діагностики;
- адаптивність, яка забезпечує здатність системи реагувати на зміну умов експлуатації;
- орієнтація на превентивність, що передбачає виявлення передаварійних станів до настання критичних подій.

АСБМ поєднує апаратні та програмні засоби, канали передачі даних, аналітичні модулі та інтерфейси користувача в єдиний інформаційний простір.

Функціональне призначення та завдання АСБМ

Функціональне призначення автоматизованої системи безперервного моніторингу полягає у формуванні достовірної, повної та своєчасної інформації про стан об’єкта моніторингу для забезпечення:

- раннього виявлення відхилень параметрів від нормативних значень;
- діагностики технічного стану обладнання;
- прогнозування розвитку небезпечних і передаварійних ситуацій;
- підтримки прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності;
- зниження експлуатаційних і аварійних ризиків.

Завдання АСБМ охоплюють як оперативний рівень (реагування в реальному часі), так і стратегічний рівень (аналіз тенденцій та управління життєвим циклом обладнання).

2.2 Структурна та інформаційна складові автоматизованої системи безперервного моніторингу.

Структурно автоматизована система безперервного моніторингу включає (табл. 2.1):

1. підсистему первинного вимірювання, що забезпечує реєстрацію параметрів технологічних процесів;
2. підсистему збору та попередньої обробки даних;
3. аналітичну підсистему, орієнтовану на виявлення аномалій та прогнозування;
4. підсистему підтримки прийняття рішень;
5. підсистему управління інформаційним потенціалом і безпекою даних.

Таблиця 2.1

Структурні та інформаційні складові автоматизованої системи безперервного моніторингу

№	Підсистема АСБМ	Основне призначення	Основні функції / інформаційні потоки
1	Підсистема первинного вимірювання	Реєстрація параметрів технологічних процесів	- Вимірювання фізичних, хімічних, теплогідравлічних та ядерних параметрів - Контроль критичних показників обладнання - Формування первинного інформаційного потоку

2	Підсистема збору та попередньої обробки даних	Агрегація та підготовка даних для аналізу	- Синхронізація даних з різних джерел - Фільтрація шумів та валідація сигналів - Стандартизація та формування масивів даних
3	Аналітична підсистема	Виявлення аномалій та прогнозування стану	- Аналіз трендів і динаміки параметрів - Виявлення передаварійних станів та аномалій - Прогнозування розвитку небезпечних ситуацій - Використання математичного моделювання та алгоритмів машинного навчання
4	Підсистема підтримки прийняття рішень (DSS)	Інформаційна підтримка оперативного персоналу	- Візуалізація стану технологічних та безпекових систем - Надання сценарних рекомендацій і алгоритмів дій персоналу - Підвищення обґрунтованості управлінських рішень
5	Підсистема управління інформаційним потенціалом і безпекою даних	Забезпечення когерентності та безпеки інформації	- Інтеграція даних із всіх підсистем - Контроль достовірності, повноти та актуальності даних - Управління доступом та кібербезпекою - Архівування та аналіз історичних даних

Наукове узагальнення: Запропонована структура АСБМ забезпечує повноцінний цикл інформаційного забезпечення безпеки та надійності об’єкта, починаючи від первинного вимірювання параметрів до підтримки управлінських рішень та формування цифрової когерентності. Така ієрархія підсистем дозволяє інтегрувати технологічні, аналітичні та управлінські процеси в єдиний інформаційний контур, що критично важливо для енергетичних підприємств та АЕС.

Інформаційна складова АСБМ характеризується високими вимогами до достовірності, повноти, актуальності та захищеності даних, що особливо важливо для об’єктів критичної інфраструктури.

Розглянуто автоматизована система безперервного моніторингу в контексті безпеки та цифрової когерентності.

У межах даного дослідження АСБМ розглядається не лише як технічний засіб контролю, а як методологічний інструмент забезпечення комплексної безпеки та цифрової когерентності управління. Безперервний моніторинг формує основу для інтеграції технологічних, інформаційних і управлінських підсистем, забезпечуючи узгодженість їх функціонування.

Цифрова когерентність у цьому контексті проявляється у здатності системи моніторингу забезпечувати адекватне відображення реального стану об’єкта в інформаційному просторі, мінімізуючи інформаційні розриви між фізичними процесами та управлінськими рішеннями.

2.3 Порівняльна характеристика автоматизованої системи безперервного моніторингу та традиційних систем контролю.

Розглянуто порівняльна характеристика автоматизованої системи безперервного моніторингу та традиційних систем контролю (табл. 2.2).

Автоматизована система безперервного моніторингу є складним багаторівневим інформаційно-аналітичним комплексом, що забезпечує постійний контроль, аналіз і прогнозування стану технологічних процесів та

обладнання. Її впровадження створює передумови для переходу від реактивного управління до превентивного, підвищення рівня безпеки та ефективності функціонування енергетичних підприємств в умовах цифрової трансформації.

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика автоматизованої системи безперервного моніторингу та традиційних систем контролю

Критерій порівняння	Традиційні системи контролю	Автоматизована система безперервного моніторингу (АСБМ)
Характер контролю	Періодичний або квазібезперервний	Строго безперервний у реальному часі
Часова реакція	Реактивна (після перевищення порогів)	Превентивна (виявлення передаварійних станів)
Рівень автоматизації	Часткова автоматизація, значна участь оператора	Високий рівень автоматизації з мінімізацією людського фактора
Обробка даних	Порогова, детермінована	Інтелектуальна, з використанням аналітики та прогнозування
Аналіз динаміки параметрів	Обмежений або відсутній	Повноцінний аналіз трендів і часових рядів
Прогнозування стану об’єкта	Не передбачене або формальне	Реалізується на основі моделей і машинного навчання
Виявлення прихованих дефектів	Практично неможливе	Забезпечується за рахунок аналізу багатовимірних

		даних
Інтеграція з АСУ ТП	Обмежена або фрагментарна	Повна інтеграція в єдиний інформаційний простір
Підтримка прийняття рішень	Відсутня або мінімальна	Реалізована через DSS та сценарні рекомендації
Адаптивність до змін режимів	Низька	Висока, з урахуванням експлуатаційних умов
Управління життєвим циклом обладнання	Орієнтація на регламентні ремонти	Орієнтація на прогнозне обслуговування
Інформаційна узгодженість (когерентність)	Фрагментарна	Високий рівень цифрової когерентності
Вимоги до якості даних	Базові	Підвищені (достовірність, повнота, актуальність)
Роль у забезпеченні безпеки	Контроль граничних значень	Комплексне забезпечення техногенної та інформаційної безпеки
Сфера застосування	Окремі вузли та процеси	Система в цілому (об’єкт – процес – середовище)

Розглянуто порівняльна характеристика АСБМ та традиційних систем контролю на теплових електростанціях (табл. 2.3).

Отримані порівняльні характеристики свідчать, що автоматизована система безперервного моніторингу принципово відрізняється від традиційних систем контролю не лише рівнем автоматизації, а й методологією управління. Якщо традиційні системи орієнтовані на фіксацію критичних відхилень, то АСБМ забезпечує превентивне управління безпекою та надійністю на основі інтегрованого аналізу даних і прогнозування.

Таблиця 2.3

Порівняльна характеристика АСБМ та традиційних систем контролю на теплових електростанціях

Критерій порівняння	Традиційні системи контролю на ТЕС	Автоматизована система безперервного моніторингу (АСБМ) ТЕС
Об’єкт моніторингу	Окремі агрегати (котел, турбіна, генератор)	ТЕС як єдиний енерго-технологічний комплекс
Характер контролю	Періодичний або квазібезперервний	Повністю безперервний у режимі реального часу
Час реагування	Після досягнення аварійних порогів	До настання критичних і передаварійних режимів
Контроль тепломеханічних процесів	Контроль граничних параметрів	Аналіз динаміки теплообміну, горіння та пароутворення
Моніторинг процесу горіння палива	Фрагментарний (O_2, температура)	Комплексний (стехіометрія, нестабільність факела, ефективність згоряння)
Обробка експлуатаційних даних	Детермінована, порогова	Інтелектуальна, багатовимірна
Аналіз трендів та деградації	Обмежений	Повноцінний аналіз з урахуванням старіння обладнання
Прогнозування відмов	Не реалізується	Прогноз несправностей котлоагрегатів і турбін
Підтримка управління режимами	Ручна або напівавтоматична	Автоматизована оптимізація навантажень

Енергоефективність	Контролюється постфактум	Оптимізується в режимі реального часу
Витрати палива	Облік без глибокого аналізу	Мінімізація питомих витрат палива
Екологічний контроль	Вимірювання викидів	Прогнозування та зниження екологічних навантажень
Інтеграція з АСУ ТП	Часткова	Повна інтеграція у цифровий контур ТЕС
Підтримка прийняття рішень	Обмежена	Реалізована через інтелектуальні рекомендації
Адаптація до змін режимів	Низька	Висока, з урахуванням змін палива і навантаження
Ремонтна стратегія	Регламентна	Прогнозно-орієнтована
Рівень інформаційної когерентності	Фрагментарний	Високий, у межах єдиного інформаційного середовища
Роль у безпеці ТЕС	Контроль аварійних станів	Забезпечення надійності та виробничої безпеки

Розглянуто порівняльна характеристика АСБМ та традиційних систем контролю на атомних електростанціях (табл. 2.4).

Таким чином, автоматизована система безперервного моніторингу на теплових електростанціях є еволюційним розвитком традиційних систем контролю, орієнтованим не лише на фіксацію порушень технологічних параметрів, а й на управління енергоефективністю, технічним станом і безпекою ТЕС у динамічних режимах експлуатації. АСБМ формує інформаційну основу для переходу від реактивного до проактивного управління тепловою генерацією в умовах цифровізації.

Таблиця 2.4

Порівняльна характеристика АСБМ та традиційних систем контролю на атомних електростанціях

Критерій порівняння	Традиційні системи контролю на АЕС	Автоматизована система безперервного моніторингу (АСБМ) АЕС
Об’єкт моніторингу	Окремі системи та контури безпеки	АЕС як цілісний ядерно-енергетичний комплекс
Характер контролю	Безперервний, але параметрично обмежений	Інтегрований безперервний багатоконтурний
Час реагування	Реактивний (після перевищення уставок)	Превентивний (ідентифікація передаварійних станів)
Контроль ядерних процесів	Потужність реактора, нейтронний потік	Просторово-часова динаміка нейтронного поля
Моніторинг теплофізичних параметрів	Температура і тиск у ключових точках	Повний аналіз теплогідравлічних процесів
Контроль стану активної зони	Опосередкований	Інтелектуальна діагностика деградації ТВЕЛ
Аналіз систем безпеки	Функціональний контроль	Становий і прогнозний аналіз
Обробка інформації	Порогова, детермінована	Аналітично-інтелектуальна
Аналіз трендів	Обмежений	Повний аналіз динамічних режимів
Прогнозування аварійних ситуацій	Формально не реалізується	Моделювання сценаріїв розвитку аварій

Підтримка прийняття рішень	Інструктивна	Інтелектуальна, сценарна
Людський фактор	Високий рівень впливу	Мінімізований за рахунок автоматизації
Інтеграція з АСУ ТП	Часткова	Повна інтеграція в єдину цифрову платформу
Інформаційна когерентність	Фрагментарна	Висока когерентність усіх контурів
Радіаційний контроль	Вимірювання доз і рівнів	Прогноз розповсюдження радіації
Вимоги до достовірності даних	Високі	Критично високі (із валідацією даних)
Відповідність нормам ядерної безпеки	Регламентна	Інтегрована відповідність стандартам
Роль у загальній безпеці АЕС	Контроль станів	Забезпечення глибокоешелонованого захисту

Порівняльний аналіз свідчить, що автоматизована система безперервного моніторингу на атомних електростанціях забезпечує якісно новий рівень управління ядерною та радіаційною безпекою, переходячи від параметричного контролю до інтегрованого прогнозно-орієнтованого управління станом об’єкта. АСБМ формує інформаційне підґрунтя для реалізації концепції глибокоешелонованого захисту та мінімізації впливу людського фактора.

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано доцільність переходу від параметрично-орієнтованих традиційних систем контролю до інтегрованої автоматизованої системи безперервного моніторингу атомної електростанції, яка забезпечує превентивне виявлення передаварійних станів на основі аналізу просторово-часової динаміки ядерних, теплофізичних і радіаційних процесів.

2. Розвинено науково-методичний підхід до забезпечення ядерної та радіаційної безпеки АЕС шляхом впровадження АСБМ, що, на відміну від існуючих рішень, базується на інтеграції багатоконтурних даних, інтелектуальній обробці інформації та сценарному прогнозуванні розвитку небезпечних режимів.

3. Удосконалено концепцію глибокоешелонованого захисту АЕС за рахунок введення інформаційного рівня безпеки, реалізованого через АСБМ, який забезпечує когерентність даних між технологічними системами, системами безпеки та системами підтримки прийняття рішень.

4. Дістало подальший розвиток теоретичне положення щодо зниження впливу людського фактора в управлінні АЕС шляхом переходу від інструктивного реагування до інтелектуальної підтримки оператора на основі прогнозно-аналітичних моделей.

Практична значущість

1. Запропоновані положення щодо впровадження АСБМ можуть бути використані при модернізації діючих атомних електростанцій з реакторами типу ВВЕР для підвищення рівня ядерної, радіаційної та інформаційної безпеки.

2. Результати дослідження створюють практичну основу для переходу до прогнозно-орієнтованого технічного обслуговування основного обладнання АЕС (реакторної установки, парогенераторів, систем безпеки), що дозволяє знизити ризик незапланованих зупинок і аварійних ситуацій.

3. Використання АСБМ забезпечує підвищення оперативності та обґрунтованості управлінських рішень персоналу АЕС за рахунок інтеграції технологічної, діагностичної та аналітичної інформації в єдиному інформаційному середовищі.

4. Практичні результати можуть бути застосовані при розробці нормативно-методичних документів, технічних завдань та програм цифрової трансформації атомної енергетики, спрямованих на підвищення безпеки та надійності експлуатації АЕС.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО МОДУЛЯ СИСТЕМИ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ВИЯВЛЕННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1. Розробка етапів моделей для виявлення нештатних станів та аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку

Розробка моделей для виявлення аварійних та передаварійних станів у технологічних процесах енергоблоку є критично важливою для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації електростанцій. Такі моделі дозволяють автоматично ідентифікувати відхилення технологічних параметрів від нормативних значень і своєчасно реагувати на потенційні аварійні ситуації.

Процес розробки моделей складається з кількох взаємопов'язаних етапів, які логічно формують цілісний підхід до побудови системи превентивного моніторингу (рис. 3.1).

Етап 1. Збір та попередня обробка даних технологічного процесу

1.1. Збір даних

- Реєстрація фізико-технічних параметрів енергоблоку: температура теплоносія та пари, тиск у котлах і трубопроводах, витрати палива, швидкість обертання турбін, рівень води в контурах.
- Використання датчиків і систем моніторингу з високою точністю та оновленням даних у режимі реального часу.

1.2. Попередня обробка даних

- Фільтрація шумів, виявлення пропусків і аномалій, коригування помилкових вимірювань.
- Заповнення пропусків методом інтерполяції або регресії, стандартизація даних для подальшого аналізу.
- Формування якісного масиву даних, що є базою для розробки аналітичних і прогностичних моделей.

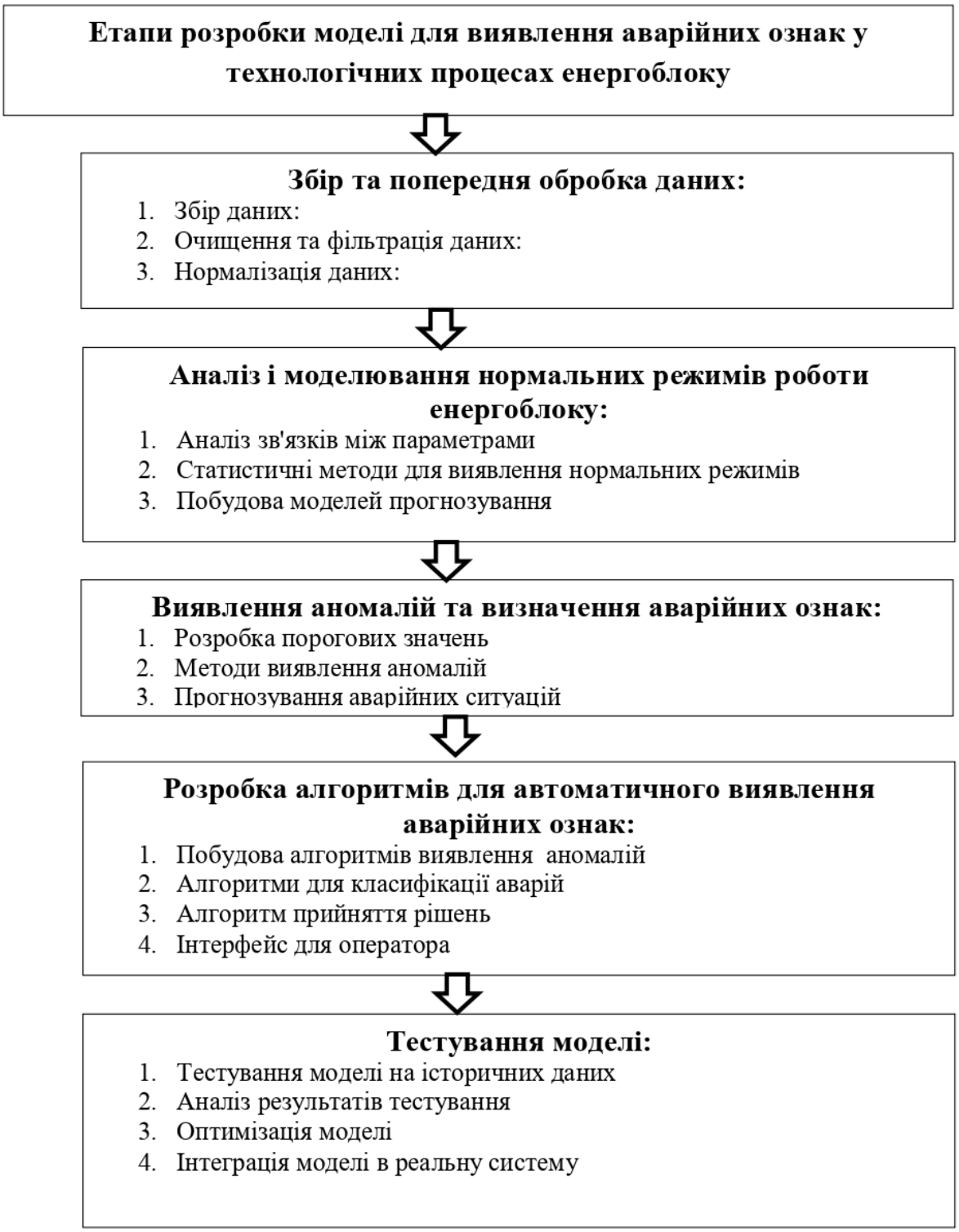

Рис. 3.1 – Розробка етапів моделі для виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку

Етап 2. Вибір ознак і параметрів для моделювання аварійних станів

На цьому етапі здійснюється ідентифікація ключових ознак і параметрів, що найбільшою мірою впливають на виникнення аварійних станів.

- Вибір ознак здійснюється на основі фізико-технічних закономірностей роботи енергоблоку, аналізу історичних даних та рекомендацій технологічних регламентів.
- Визначаються ключові параметри, такі як: тиск і температура в котлах, швидкість обертання турбін, витрати палива, рівень води, вібраційні характеристики валів, електричні параметри генераторів.
- Формується множина контрольних ознак, яка є вхідним сигналом для математичних та інтелектуальних моделей.

Етап 3. Розробка математичних та інтелектуальних моделей

Цей етап передбачає створення моделей, здатних виявляти аномальні та передаварійні стани на основі аналізу багатовимірних даних:

- Математичні моделі включають статистичні методи аналізу, моделі регресії, моделі часових рядів, які дозволяють описати динаміку параметрів енергоблоку.
- Інтелектуальні моделі базуються на алгоритмах машинного навчання та штучного інтелекту (класифікація, кластеризація, нейронні мережі), що дозволяють ідентифікувати приховані закономірності та аномалії, які неможливо виявити традиційними методами.
- Розробка моделей передбачає налаштування порогових значень, вагових коефіцієнтів, що визначають критичні стану системи.

Етап 4. Валідація і тестування моделей на історичних даних

Для підтвердження ефективності та точності моделей проводиться валідація на історичних даних енергоблоку:

- Використовуються архівні дані моніторингу, що містять як нормальні, так і нештатні режими роботи.

- Перевіряється здатність моделі правильно класифікувати аномальні стани та прогнозувати потенційні аварії.
- Проводиться оцінка точності, чутливості та специфічності моделей, визначаються помилки першого та другого роду.
- За необхідності моделі коригуються, оптимізуються алгоритми обробки даних та налаштування порогів.

Етап 5. Інтеграція моделей у автоматизовану систему моніторингу

Після підтвердження ефективності моделі інтегруються у єдину автоматизовану систему моніторингу енергоблоку:

- Моделі стають частиною аналітичної підсистеми АСБМ, яка забезпечує безперервний контроль та прогнозування стану обладнання.
- Встановлюються інтерфейси для передачі результатів моделювання в систему підтримки прийняття рішень оператора.
- Забезпечується інтеграція з іншими підсистемами: первинного збору даних, управління інформаційним потенціалом та безпекою, архівування результатів.
- Розробляється механізм автоматичного сповіщення про критичні відхилення, що дозволяє оперативно реагувати на потенційні аварії.

Послідовна реалізація зазначених етапів забезпечує створення ефективної моделі виявлення аварійних ознак, яка є основою для превентивного моніторингу енергоблоків. Такий підхід дозволяє зменшити ризик аварій, підвищити надійність і безпеку експлуатації, а також формує основу для інтелектуальної автоматизації управління технологічними процесами на електростанціях.

3.2 Розробка автоматизованого модуля системи безперервного моніторингу для виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку для забезпечення стабільної роботи електростанції

Розробка автоматизованого модуля виявлення аварійних ознак технологічних параметрів енергоблоку є критичною складовою системи забезпечення надійності та безпеки енергетичних об’єктів. Такий модуль дозволяє своєчасно виявляти порушення нормального функціонування технологічних процесів, зменшувати ризик аварійних ситуацій, підвищувати ефективність моніторингу та сприяти оперативному прийняттю рішень.

Основні етапи розробки та функції модуля (табл. 3.1):

1. Аналіз технологічних параметрів

Для забезпечення ефективного контролю необхідно визначити критичні параметри енергоблоку, які сигналізують про потенційні аварійні стани:

- тиск і температура пари;
- рівень води в котлі та конденсаторі;
- швидкість обертання турбіни;
- споживана потужність, напруга та струм генератора;
- параметри охолодження;
- рівень вібрацій і шуму.

2. Розробка алгоритмів виявлення аварійних ознак

- Класичні методи: встановлення порогових значень для кожного параметра;
- Методи машинного навчання: прогнозування аномальних станів за історичними даними, класифікація нормальних та аварійних випадків;
- Регресійні та багатокритерійні методи: оцінка динаміки параметрів та одночасний аналіз кількох показників для підвищення точності виявлення аномалій.

3. Інтерфейс моніторингу та сповіщення

- Візуалізація поточних і історичних значень параметрів;
- Оперативне сповіщення операторів через локальні дисплеї або мобільні пристрої;
- Формування аналітичних звітів про стан енергоблоку та дії, що були здійснені.

4. Інтеграція з існуючими системами управління

- Підключення до SCADA/DCS для безперебійного збору та обробки даних;
- Взаємодія з системами аварійного реагування та діагностики у реальному часі.
- 2. Визначення порогів аварійних сигналів
- o Жорсткі та динамічні пороги для критичних параметрів, що враховують режим роботи енергоблоку.

Таблиця 3.1

Структура автоматизованого модуля

Компонент	Основні функції
Збір даних (Data Acquisition Unit)	Підключення до датчиків, збір даних у реальному часі, інтеграція з SCADA/DCS.
Обробка та зберігання даних (Data Processing & Storage)	Фільтрація, нормалізація, архівування даних, передача до аналітичних модулів.
Аналіз та виявлення аномалій (Anomaly Detection & Analysis)	Порогові методи, машинне навчання, регресія, класифікація, багатокритерійний аналіз.
Візуалізація та інтерфейс користувача (UI & Visualization)	Відображення параметрів, індикація аварій, формування звітів.
Управління та реагування (Control & Response)	Автоматичне або ручне реагування на аварії, інтеграція з системами управління.
Комунікація та інтеграція (Communication & Integration)	Надійний обмін даними між компонентами та інтеграція з зовнішніми системами.
Безпека та захист даних (Security & Data Protection)	Шифрування, аутентифікація, захист від кібератак.
Підтримка та оновлення (Maintenance & Updates)	Моніторинг працездатності, оновлення алгоритмів, збір зворотного зв’язку.

3. Перевірка та верифікація

o Тестування на реальних або змодельованих даних для оцінки точності алгоритмів;

o Верифікація здатності модулю прогнозувати аварійні стани.

4. Постійне вдосконалення

o Збір зворотного зв’язку від операторів та інженерів;

o Регулярне оновлення алгоритмів і моделей на основі нових даних та сучасних методів аналізу.

Наукове та практичне обґрунтування

Розробка такого модуля забезпечує:

- Своєчасне виявлення аварійних ознак та мінімізацію техногенних ризиків;
- Оптимізацію процесів моніторингу і діагностики за рахунок використання інтелектуальних алгоритмів;
- Підвищення ефективності управління енергоблоком завдяки інтеграції з SCADA/DCS та системами аварійного реагування;
- Наукову новизну у використанні комбінації порогових методів, машинного навчання та багатокритерійного аналізу для раннього прогнозування аварійних станів.

Структурна схема автоматизованого модуля системи безперервного моніторингу виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку електростанції показано на рис. 3.2.

На рис. 3.2 представлено структурну схему автоматизованого модуля системи безперервного моніторингу та виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку електростанції.

Схема відображає ієрархічну організацію системи та взаємозв’язок її основних функціональних компонентів. У верхній частині показано блок збору даних, який включає датчики (температури) та модуль збору даних.

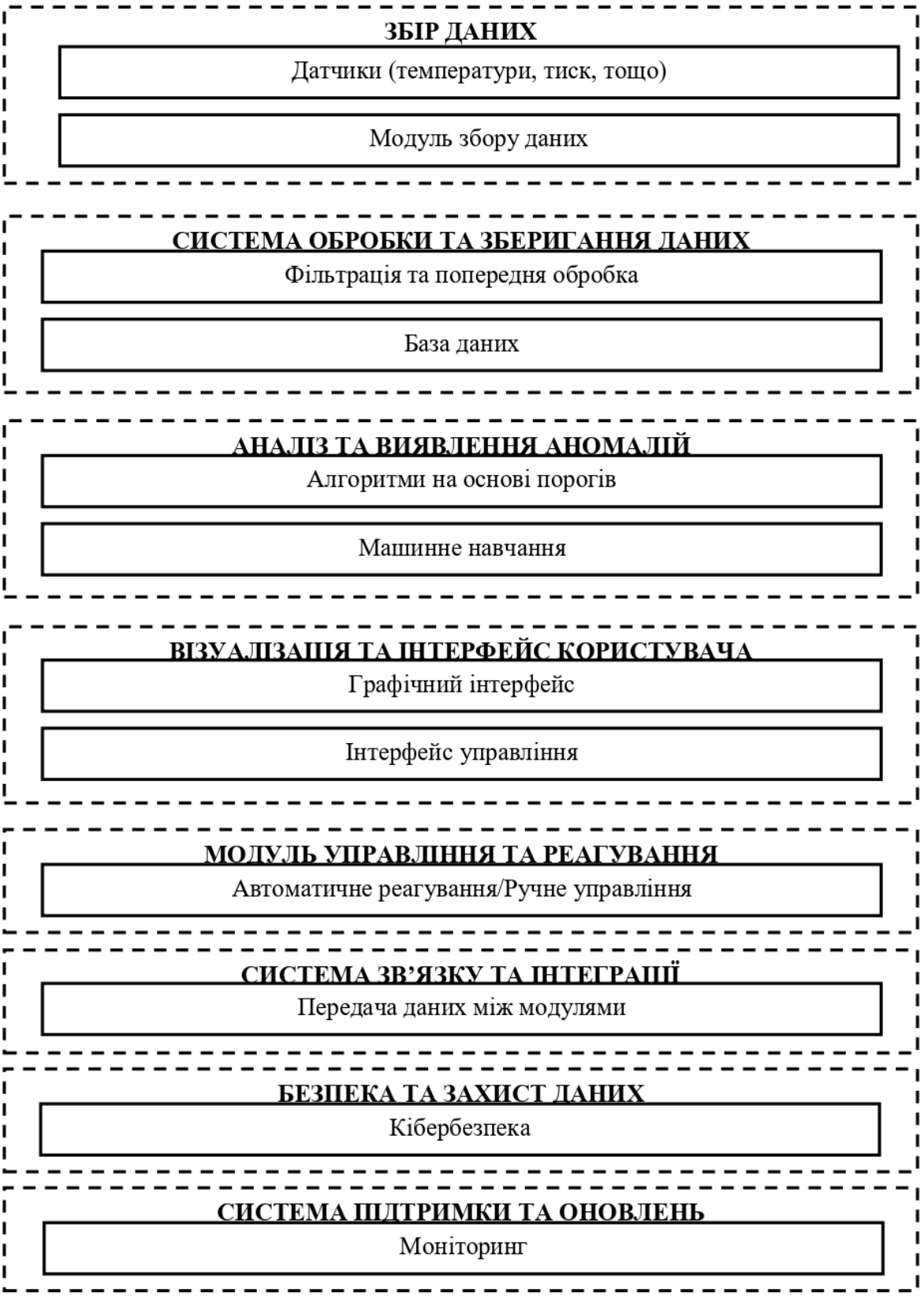

Рис. 3.2 – Структурна схема автоматизованого модуля системи безперервного моніторингу виявлення аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоку електростанції.

Саме на цьому етапі здійснюється первинне отримання інформації про стан технологічних процесів енергоблоку.

Далі представлено систему обробки та зберігання даних, яка виконує фільтрацію та попередню обробку сигналів, а також забезпечує їх накопичення в базі даних.

Цей блок є критично важливим для підготовки даних до подальшого аналізу. Наступним рівнем є аналіз та виявлення аномалій, де застосовуються алгоритми на основі порогових значень і методи машинного навчання.

Саме тут відбувається ідентифікація відхилень від нормального режиму роботи та формування ознак потенційних аварійних ситуацій.

Блок візуалізації та інтерфейсу користувача забезпечує представлення результатів аналізу у зручному для оператора вигляді через графічний інтерфейс, а також надає можливість управління системою.

У свою чергу, модуль управління та реагування реалізує механізми автоматичного реагування на виявлені відхилення або надає можливість ручного втручання оператора для прийняття рішень.

Система зв’язку та інтеграції забезпечує передачу даних між усіма модулями, підтримуючи цілісність і безперервність функціонування системи. Окремо виділено блок безпеки та захисту даних, який відповідає за кібербезпеку та захист інформації від несанкціонованого доступу. Завершальним елементом є система підтримки та оновлень, що включає функції моніторингу працездатності системи та її оновлення.

Таким чином, наведена схема демонструє комплексний підхід до організації безперервного моніторингу, який охоплює всі етапи — від збору даних до прийняття управлінських рішень і забезпечення безпеки функціонування енергоблоку.

Висновки до розділу 3

У розділі проаналізовано проблеми, сучасні підходи та перспективи розвитку автоматизованих систем виявлення аварійних ознак технологічних параметрів енергоблоків.

Основні проблеми впровадження автоматизованих систем:

1. Обмеження існуючої інфраструктури енергоблоків, що ускладнює інтеграцію сучасних модулів моніторингу та управління.

2. Якість даних: інформація від різних датчиків може містити шум або бути неповною, що впливає на точність алгоритмів виявлення аномалій.

3. Високі витрати на інтеграцію: модернізація старих енергетичних систем із застосуванням новітніх технологій потребує значних фінансових та часових ресурсів.

Перспективи вдосконалення автоматизованих систем:

1. Інтеграція з Інтернетом речей: розширення мережі датчиків і пристроїв забезпечить більш детальний та точний збір даних у реальному часі, підвищуючи ефективність виявлення аномалій.

2. Впровадження алгоритмів машинного та глибокого навчання: застосування інтелектуальних моделей дозволить покращити точність прогнозування аварійних станів і знизити необхідність ручного налаштування системи.

3. Інтелектуальні системи прогнозування: аналіз великих масивів даних дозволяє передбачати потенційні аварії завчасно, що підвищує надійність і безпеку роботи енергоблоків.

Практичне значення впровадження автоматизованих систем:

підвищення економічної ефективності енергоблоків через зменшення витрат на ремонт і технічне обслуговування;

зниження кількості аварійних ситуацій та підвищення надійності експлуатації обладнання;

збільшення терміну служби ключових технологічних агрегатів за рахунок своєчасного реагування на аномальні стани.

Таким чином, розробка та впровадження автоматизованих модулів виявлення аварійних ознак є важливим кроком у підвищенні технологічної безпеки, ефективності управління та економічної стійкості енергетичних об’єктів.

ВИСНОВКИ

Проведено комплексне дослідження щодо розробки автоматизованого модуля виявлення аварійних ознак технологічних параметрів енергоблоків електростанцій. Основною метою є створення ефективної системи для своєчасного виявлення відхилень та потенційних аварійних ситуацій на ранніх етапах їх зародження, що забезпечує підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності роботи енергоблоків.

1. Постановка задачі та принципи розробки модуля
   - Основне завдання полягає у ранньому виявленні аварійних ознак у технологічних процесах енергоблоків.
   - Розробка базується на принципах надійності, швидкодії, масштабованості та адаптивності до різних технологічних режимів.
   - Використання даних реального часу, інтеграція з існуючими системами моніторингу та алгоритмами аналізу даних забезпечує високу точність виявлення аномалій.
2. Алгоритми та моделі для виявлення аномалій
   - Використання статистичних методів (регресія, аналіз головних компонент), ймовірнісних моделей (гауссові моделі) та алгоритмів машинного навчання (класифікаційні моделі, нейронні мережі, SVM, дерева рішень).
   - Методи глибокого навчання дозволяють виявляти складні патерни та тонкі відхилення між нормальними і аварійними режимами.
   - Алгоритми повинні працювати з великими обсягами даних у реальному часі для мінімізації часу реагування на відхилення.
3. Структура автоматизованого модуля
   - Основні компоненти:
     - Збір даних: інтеграція з існуючими системами моніторингу для отримання технологічних параметрів.

- Обробка та аналіз: виявлення відхилень, трендів та аномалій.
- Система попереджень: сповіщення операторів та автоматичне реагування.
- Інтерфейс користувача: візуалізація даних, моніторинг стану технологічного процесу та аналіз інформації.

4. Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту

- Машинне навчання забезпечує покращення точності виявлення аномалій на основі історичних даних.
- Глибоке навчання дозволяє виявляти складні нелінійні патерни.
- Алгоритми без нагляду (кластеризація) виявляють нові типи аномалій, що підвищує адаптивність системи.

5. Розробка програмного забезпечення та інтеграція

- Програмне забезпечення реалізує збір, обробку та аналіз даних і інтегрується з існуючими системами моніторингу та управління.
- Інтерфейс користувача розробляється інтуїтивно зрозумілим і зручним для операторів.
- Інтеграція забезпечує взаємодію з іншими компонентами технологічного процесу та безперебійне функціонування модуля.

6. Теоретична значимість дослідження

- Розвиток теорії моніторингу та діагностики: розширення методів виявлення аномалій і прогнозування аварій, оптимізація технічного обслуговування.
- Інтеграція сучасних інформаційних технологій: застосування Big Data, машинного навчання та моделей аналізу аномалій для автоматизації складних процесів.
- Поглиблення теорії автоматизованих систем управління: інтеграція моніторингу з управлінськими алгоритмами для корекції параметрів у реальному часі.

- Розробка методів прогнозування аварій: передбачення потенційних відмов на основі аналізу даних від датчиків і сенсорів.
- Підвищення безпеки енергоблоків: раннє виявлення небезпечних умов підвищує надійність і стабільність роботи.
- Оптимізація управлінських рішень: автоматизація прийняття рішень на основі аналітики даних для забезпечення стабільної роботи енергоблоків.
- Системний аналіз взаємодії компонентів: комплексний підхід до інтеграції енергетичних систем, сенсорів, операторів та модулів управління.
- Розробка моделей оцінки ефективності: визначення точності, надійності та швидкодії виявлення аномалій, врахування факторів ризику та невизначеності.

Розробка автоматизованого модуля виявлення аварійних ознак є критично важливим кроком для підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності енергоблоків. Інтеграція сучасних алгоритмів машинного навчання, глибокого навчання та інтелектуальних систем прогнозування дозволяє своєчасно реагувати на потенційні аварії, зменшувати ризики техногенних відмов і оптимізувати управління енергетичними об’єктами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pylypenko H., Fedorova N., Lytvynenko N., Pylypenko Yu. (2025). Breakthrough technologies of social transformations: devising an identification methodology. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Volume 2, №13 (134). 15 – 27. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326555

2. Chen, F., Huang, Q., Song, M., Liu, X., Zeng, W., Song, H., Cheng, K. (2025). A study on the development of digital model of digital twin in nuclear power plant based on a hybrid physics and data-driven approach. Applied Thermal Engineering, 271, 126289. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126289

3. Qi, F., Li, W., Liu, Z., Li, Q., Li, Y., Huang, Y., Zhao, B., Zhang, Y., Li, C. (2022). Gradient percolation of fission gases in nuclear fuel pellet. Journal of Nuclear Materials, 571, 153993. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153993

4. Chen, M., Liu, H., Zhao, W., Zhang, Y., Yu, W., Peng, Q., Wang, S., Lin, L. (2025). Development of the environmental assisted fatigue assessment method for nuclear plants in digital twin. Nuclear Engineering and Technology, 57(6), 103402. https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103402

5. Daniell, J., Kobayashi, K., Alajo, A., Alam, S. B. (2025). Digital twin-centered hybrid data-driven multi-stage deep learning framework for enhanced nuclear reactor power prediction. Energy and AI, 19, 100450. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100450

6. Prokhorova, V., Budanov, M., Budanov, P. (2024). Devising an integrated methodology for energy safety assessment at an industrial power-generating enterprise. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(13(130)), 118–131. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308056

7. Ren, S., Kong, C., Gu, Y., Gu, S., Zeng, S., Li, G., Yang, T., & Zhao, Y. (2022). Measurement pitting morphology characteristic of corroded steel surface and fractal reconstruction model. Measurement, 190, 110678. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110678

8. Prokhorova, V., Budanov, O., Budanov, P., Slastianykova, K. (2025). Comprehensive methodology for estimating information safety at enterprises of

electroenergy system under the conditions of digital coherence. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(13(134)), 27–37. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.327159

9. Budanov, P., Brovko, K., Melnykov, V., Yakymchuk, M., Kononov, V., Kyrysov, I., Nosyk, A., Karpenko, O., Kalnoy, S., Khomiak, E. (2025). Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(9(136)), 39–49. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712

10. Ferriol-Galmes, M., Suarez-Varela, J., Paillisse, J., Shi, X., Xiao, S., Cheng, X., Barlet-Ros, P., Cabellos-Aparicio, A. (2022). Building a digital twin for network optimization using Graph Neural Networks. Computer Networks, 217, 109329. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109329

11. Prokhorova, V., Budanov, O., Budanov, P., Slastianykova, K. (2025). Devising a methodology for estimating the information potential of energy enterprises under the conditions of digital coherency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(13(135)), 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.332324

12. Kochunas, B., Huan, X. (2021). Digital twin concepts with uncertainty for nuclear power applications. Energies, 14(14), 4235. https://doi.org/10.3390/en14144235

13. Prantikos, K., Tsoukalas, L. H., Heifetz, A. (2022). Physics-Informed Neural Network solution of Point Kinetics Equations for a nuclear reactor digital twin. Energies, 15(20), 7697. https://doi.org/10.3390/en15207697

14. Hossain, R., Ahmed, F., Kobayashi, K., Koric, S., Abueidda, D., Alam, S. B. (2025). Virtual sensing-enabled digital twin framework for real-time monitoring of nuclear systems leveraging deep neural operators. Materials Degradation, 9(1), 21. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13762

15. Karnik, N., Abdo, M. G., Estrada-Perez, C. E., Yoo, J. S., Cogliati, J. J., Skifton, R. S., Manohar, K. (2024). Constrained optimization of sensor placement

for nuclear digital twins. IEEE Sensors Journal, 24(9), 15501–15516. https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3368875

16. Stewart, R., Treviño, E., Shields, A., Heaps, K., Darrington, J., Williams, Q., Pope, C., Scott, J., Baker, B., Palmer, J., Vainqueur, B., Palmer, T. S., Palmer, C., Bays, S., Schanfein, M., Reyes, G., Ritter, C. (2025). The AGN-201 digital twin: A test bed for remotely monitoring nuclear reactors. Annals of Nuclear Energy, 213, 111041. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.111041

17. Prokhorova, V., Budanov, O., Budanov, M., Slastianykova, K. (2025). Building a consolidated model of digital coherence for managing the information potential at power enterprises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(13(136)), 58–69. https://doi.org/10.15587/1729-4061.202

18. Nguyen, T. N., Ponciroli, R., Bruck, P., Esselman, T. C., Rigatti, J. A., Vilim, R. B. (2022). A digital twin approach to system-level fault detection and diagnosis for improved equipment health monitoring. Annals of Nuclear Energy, 170, 109002. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109002

19. Moaveninejad, S., D'Onofrio, V., Tecchio, F., Ferracuti, F., Iarlori, S., Monteriù, A., Porcaro, C. (2024). Fractal dimension as a discriminative feature for high accuracy classification in motor imagery EEG-based brain-computer interface. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 244, 107944. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107944

20. Tang, J., Feng, L., Li, Y., Liu, J., Liu, X. (2016). Fractal and pore structure analysis of Shengli lignite during drying process. Powder Technology, 303, 251–259. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.042

21. Khadersab, A., Shivakumar, S. (2018). Vibration analysis techniques for rotating machinery and its effect on bearing faults. Procedia Manufacturing, 20, 247–252. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.036

22. Chen, B., Li, Y., Zeng, N., He, W. (2019). Fractal lifting wavelets for machine fault diagnosis. IEEE Access, 7, 50912–50932. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908213

23. Ansari, M. Y., Ahmad, A., Khan, S. S., Bhushan, G., Mainuddin. (2020). Spatiotemporal clustering: A review. Artificial Intelligence Review, 53(4), 2381–2423. https://doi.org/10.1007/s10462-019-09736-1

24. Ríos, J., Staudter, G., Weber, M., Anderl, R., Bernard, A. (2020). Uncertainty of data and the digital twin: A review. International Journal of Product Lifecycle Management, 12(4), 329–358. https://doi.org/10.1504/IJPLM.2020.112778

25. Kareem, B., Jewo, A. O. (2015). Development of a model for failure prediction on critical equipment in the petrochemical industry. Engineering Failure Analysis, 56, 338–347. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.01.006

26. Ferriol-Galmés, M., Suárez-Varela, J., Paillissé, J., Shi, X., Xiao, S., Cheng, X., Cabellos-Aparicio, A. (2022). Building a digital twin for network optimization using graph neural networks. Computer Networks, 217, 109329. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109329

27. Pylypenko Yu., Pylypenko H., Lytvynenko N., Tryfonova O. Prushkivska E. (2019). Pathway of the institutional development: practice of liberal transformation in Ukraine and Belarus. Naukovui Visnyk Nationalnjho Hirnychoho Universytetu, 4, 120–127. https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/20 .

28. Pylypenko, Yu. I. (2012). Technological system of a society and its structure. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 6, 147–153. Retrieved from https://nvngu.in.ua/index.php/uk/component/jdownloads/finish/36-06/585-2012-6-pylypenko/0