

**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 Енергетична безпека

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

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

здобувачу вищої освіти Олександр ЛУПЕНОС

1. Тема «Розробка інтелектуальної системи моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку АЕС»

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 МОНІТОРИНГУ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЕНЕРГОБЛОКАХ АЕС; РОЗДІЛ 2.  
ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНОГО  
ПОЛЯ; РОЗДІЛ 3. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА  
УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ЕНЕРГОБЛОКУ; ВИСНОВКИ;  
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

---

## 6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата   |                  | Оцінка (бали) |
|--------|-------------|----------------|------------------|---------------|
|        |             | Завдання видав | Завдання прийняв |               |
|        |             |                |                  |               |

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

Керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

Костянтин БРОВКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Олександр ЛУПЕНОС

(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<br>Проведення аналізу наукової літератури | 02.10.25 —<br>05.10.25 |                                          |
| 2     | Виконання першого розділу дипломної роботи                                         | 06.10.25 —<br>15.10.25 |                                          |
| 3     | Виконання другого розділу дипломної роботи                                         | 16.10.25 —<br>29.10.25 |                                          |
| 4     | Виконання третього розділу дипломної роботи                                        | 30.10.25 —<br>26.11.25 |                                          |
| 5     | Оформлення пояснювальної записки                                                   | 27.11.25 —<br>07.12.25 |                                          |

Студент (ка)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр ЛУПЕНОС

(ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 68 ; рисунків – 8;  
таблиць – 4; літературних джерел – 20.

**Актуальність.** Забезпечення ефективного та безпечного функціонування енергоблоків атомних електростанцій вимагає постійного контролю за температурними параметрами першого контуру. Особливу важливість має виявлення нестандартних режимів циркуляції теплоносія та запобігання кризам тепловіддачі, які можуть призвести до аварій. Сучасні методи моніторингу температурного режиму не завжди враховують складну просторову структуру теплових процесів, що знижує їхню ефективність. Тому виникає потреба у вдосконаленні методів аналізу температурного поля на основі новітніх підходів, зокрема фрактально-кластерного аналізу.

**Мета.** Розробка та вдосконалення методів аналізу температурного поля першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000 з урахуванням фрактально-кластерних особливостей для підвищення точності моніторингу, прогнозування аварійних режимів роботи та оптимізації інформаційно-керуючих систем програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління технологічним процесом енергоблоку атомної електростанції.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано методи фрактального аналізу для вивчення температурних флуктуацій у першому контурі реактора. Проведено кореляційний аналіз для встановлення взаємозв'язку між температурою теплоносія та рівнем потужності реактора. Виконано порівняльний аналіз існуючих систем температурного моніторингу з подальшим узагальненням даних і формулюванням пропозицій щодо інтеграції нових підходів у інформаційно-керуючі системи атомних електростанцій.

**Результати.** Показано тісний взаємозв'язок між температурними параметрами теплоносія та динамікою роботи реакторної установки. Запропоновано нову методику моніторингу, яка враховує кластерну структуру теплових процесів та дозволяє ідентифікувати потенційні кризові

зони у теплопередачі. Методика забезпечує підвищену чутливість до змін у температурному полі та може бути застосована для прогностного аналізу в режимі реального часу. Визначено переваги інтеграції такого підходу у систему керування енергоблоком.

**Висновки.** Запропонована методика фрактально-кластерного аналізу температурного поля дозволяє підвищити ефективність контролю за тепловими процесами у першому контурі енергоблоку атомної електростанції. Вона сприяє підвищенню надійності роботи реакторного обладнання, зниженню ризиків нештатних ситуацій та продовженню строку експлуатації. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем управління та забезпечення загальної безпеки експлуатації атомних енергоблоків.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ, ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ, МОНІТОРИНГ, ПРОГНОЗУВАННЯ, БЕЗПЕКА ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК

## ABSTRACT

Pages of text – 68; pictures – 8;  
tables – 4; literary sources – 20.

**Relevance.** Ensuring the efficient and safe operation of nuclear power plant units requires continuous monitoring of the temperature parameters of the primary circuit. Of particular importance is the detection of non-standard coolant circulation modes and the prevention of heat transfer crises, which may lead to accidents. Modern methods of temperature monitoring do not always account for the complex spatial structure of thermal processes, which reduces their effectiveness. Therefore, there is a need to improve temperature field analysis methods based on advanced approaches, particularly fractal-cluster analysis.

**Objective.** To develop and enhance methods for analyzing the temperature field of the primary circuit of a VVER-1000 reactor unit, taking into account fractal-cluster characteristics, in order to improve the accuracy of monitoring, predict emergency operating modes, and optimize the information and control systems of the software and hardware complex of the automated process control system of a nuclear power plant unit.

**Research Methods.** The study employs fractal analysis methods to investigate temperature fluctuations in the reactor's primary circuit. Correlation analysis was conducted to establish the relationship between coolant temperature and reactor power level. A comparative analysis of existing temperature monitoring systems was performed, followed by data generalization and the formulation of proposals for integrating new approaches into the information and control systems of nuclear power plants.

**Results.** A strong correlation between coolant temperature parameters and the dynamics of reactor operation was demonstrated. A new monitoring methodology was proposed, which considers the cluster structure of thermal processes and enables the identification of potential crisis zones in heat transfer. The methodology provides increased sensitivity to changes in the temperature field and

can be applied for predictive analysis in real-time. The advantages of integrating this approach into the power unit control system were identified.

**Conclusions.** The proposed fractal-cluster analysis methodology for the temperature field enhances the effectiveness of thermal process control in the primary circuit of a nuclear power plant unit. It contributes to improved reliability of reactor equipment operation, reduced risk of abnormal situations, and extended service life. The obtained results can be used to improve control systems and ensure the overall safety of nuclear power plant unit operation.

KEYWORDS: FRACTAL-CLUSTER ANALYSIS, INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS, MONITORING, PREDICTION, NUCLEAR INSTALLATION SAFETY

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                         | 8  |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ<br>ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЕНЕРГОБЛОКАХ АЕС .....                                          | 10 |
| 1.1 Технологічна структура першого контуру енергоблока АЕС.....                                                                    | 10 |
| 1.2 Огляд літератури та аналіз сучасних підходів до моніторингу<br>температурного режиму в ядерних енергетичних<br>установках..... | 17 |
| 1.3 Проблеми виявлення аварійних режимів теплопередачі в<br>першому контурі енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР -<br>1000.....   | 19 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....                                                                                                         | 25 |
| РОЗДІЛ 2. ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ<br>ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ .....                                                     | 26 |
| 2.1 Ключові точки контролю температурного режиму з<br>урахуванням фрактально-кластерної структури теплоносія .....                 | 26 |
| 2.2 Інтелектуальна обробка даних температурних датчиків в<br>інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку<br>АЕС.....      | 29 |
| 2.3 Алгоритм фрактально-кластерного аналізу температурного<br>поля в системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС .....                      | 35 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....                                                                                                         | 53 |
| РОЗДІЛ 3. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА<br>УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ЕНЕРГОБЛОКУ .....                                  | 54 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Розробка та функціонування цифрового двійника енергоблоку<br>АЕС у складі інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП | 54 |
| .....                                                                                                                  |    |
| 3.2 Перспективи подальших досліджень .....                                                                             | 59 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....                                                                                             | 63 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                          | 65 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                       | 66 |



## ВСТУП

**Актуальність.** Сучасні енергоблоки АЕС потребують високоточних систем моніторингу температурних параметрів першого контуру, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до аварійних ситуацій, зокрема до криз тепловіддачі, локальних перегрівів або нестабільності роботи реакторної установки. Ефективний контроль температури теплоносія є критичним фактором забезпечення безпечної та надійної експлуатації ядерного реактора.

Реакторна установка ВВЕР-1000 є складною теплогідравлічною системою, де температура теплоносія безпосередньо впливає на потужність реактора, а також визначає ефективність теплопередачі між активною зоною та теплообмінним обладнанням. Будь-які флуктуації температурного поля можуть бути ознакою змін у гідродинамічному режимі першого контуру, що, своєю чергою, може спричинити зниження коефіцієнта теплопередачі або порушення циркуляції теплоносія.

Важливою задачею є визначення закономірностей зміни температурного поля, що дозволить розробити ефективні методики прогнозування потенційно небезпечних відхилень. Застосування сучасних методів аналізу, зокрема фрактально-кластерного підходу та спектрального аналізу температурних флуктуацій, дає змогу виявляти навіть незначні відхилення технологічних параметрів та прогнозувати критичні стани.

Інтеграція цих методик у інформаційно-керуючі системи програмно-технічних комплексів (ПТК) автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) енергоблоків АЕС дозволить значно підвищити точність і оперативність моніторингу стану першого контуру. Використання адаптивних алгоритмів аналізу та прогнозування температурних відхилень в інформаційно-керуючих системах ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС сприятиме своєчасному виявленню ризиків та запобіганню аварійним ситуаціям.

Впровадження таких підходів у систему управління реакторними установками забезпечить більш ефективне управління тепловими процесами, зменшення експлуатаційних ризиків та підвищення рівня безпеки енергоблоків АЕС. Це, у свою чергу, сприятиме продовженню терміну експлуатації реакторного обладнання та підвищенню надійності роботи всієї ядерної енергетичної установки.

**Об'єктом дослідження** є процес моніторингу температурного поля першого контуру енергоблоку АЕС з реакторною установкою типу ВВЕР – 1000.

**Предметом дослідження** є фрактально-кластерні методи дослідження температурного режиму.

**Мета роботи:** розробка та вдосконалення методів аналізу температурного поля першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000 з урахуванням фрактально-кластерних особливостей для підвищення точності моніторингу, прогнозування аварійних режимів роботи та оптимізації інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС.

**Завдання дослідження:**

1. Проаналізувати особливості температурного поля першого контуру реакторної установки типу ВВЕР з урахуванням кластерної структури теплових процесів та виявити чинники, що сприяють утворенню локальних зон перегріву і розвитку криз тепловіддачі.

2. Розробити та обґрунтувати фрактально-кластерний підхід до моніторингу температурного режиму, що дозволяє ідентифікувати аномальні області нагріву з підвищеною точністю, та оцінити його переваги порівняно з традиційними методами аналізу.

3. Запропонувати інтеграцію фрактально-кластерного аналізу та прогнозного моделювання в автоматизовану систему управління енергоблоком для підвищення надійності теплового контролю, стабільності роботи реакторного обладнання та загального рівня експлуатаційної безпеки.

## **РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЕНЕРГОБЛОКАХ АЕС**

### **1.1 Технологічна структура першого контуру енергоблока АЕС**

ВВЕР-1000 – це водно-водяний енергетичний реактор, у якому вода під тиском виконує роль і теплоносія, і сповільнювача нейтронів. Він належить до реакторів II покоління великої потужності з легководним охолодженням. Електрична потужність енергоблоків цього типу становить 1000 МВт, а теплова – близько 3000 МВт. В Україні реактори ВВЕР-1000 експлуатуються на Запорізькій, Рівненській, Хмельницькій та Південноукраїнській АЕС. Крім того, вони встановлені на АЕС Болгарії, Чехії та Китаї. Конструкція реактора ВВЕР-1000 представлена на рис. 1.1.

Енергоблок із реактором ВВЕР-1000 оснащений двома контурами. Перший контур є радіоактивним. Теплова енергія в ньому утворюється в результаті ланцюгової реакції ділення ядерного палива під впливом теплових нейтронів. Теплоносієм слугує вода під високим тиском із розчиненою борною кислотою. Під час проходження через активну зону реактора вода нагрівається від тепловиділення в оболонках ТВЕЛів. Далі теплоносії надходить у парогенератор.

Другий контур нерадіоактивний. Тут теплоносії передає накопичене тепло живильній воді парогенератора через поверхні теплообміну. Насичена пара під тиском 6 МПа спрямовується на турбіну, яка обертає генератор для вироблення електроенергії. Охолоджена вода за допомогою головного циркуляційного насоса повертається у реактор.

Регулювання та захист реактора здійснюється за допомогою стрижнів, які можна переміщувати по висоті активної зони. При глибокому зануренні стрижнів ланцюгова реакція зупиняється, оскільки нейтрони поглинаються матеріалом стрижнів. Їхнє переміщення здійснюється дистанційно з пульту управління.

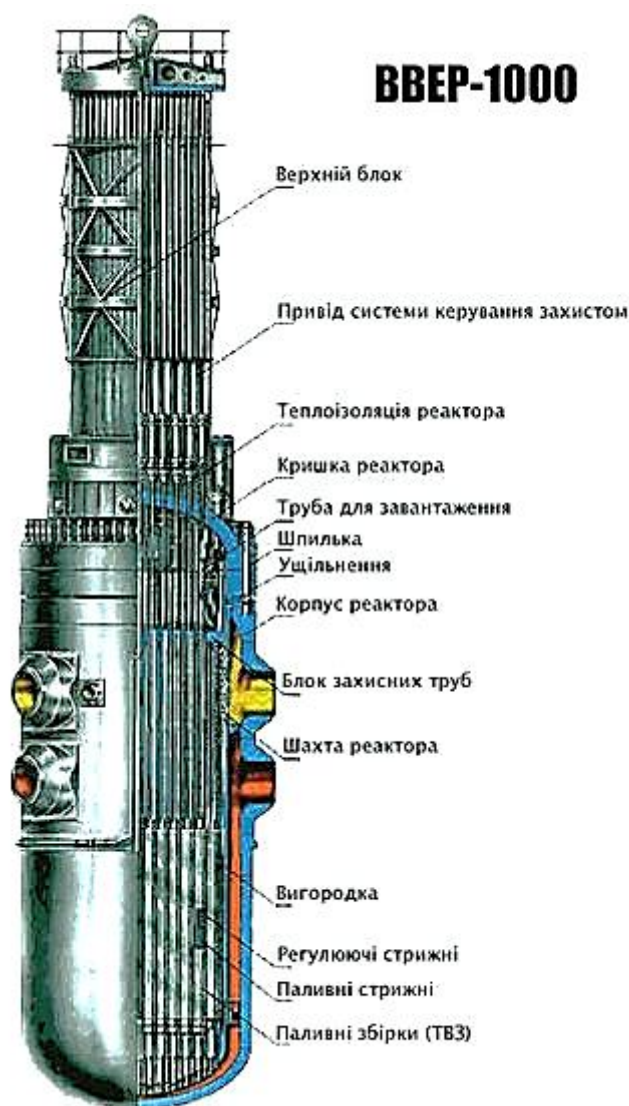


Рисунок 1.1 – Конструкція реактора ВВЕР-1000

Невелике переміщення стрижнів дозволяє підтримувати або змінювати потужність реактора. На рис. 1.2 зображена спрощена теплова схема АЕС з реактором ВВЕР-1000. Основним способом регулювання реакторів ВВЕР є застосування твердих поглиначів, із додатковим хімічним регулюванням. Залежно від функцій розрізняють:

- компенсуючі стрижні для великих, повільних змін реактивності;
- регулюючі стрижні для швидких, невеликих змін;
- стрижні аварійного захисту для термінового зупинення ланцюгової реакції.

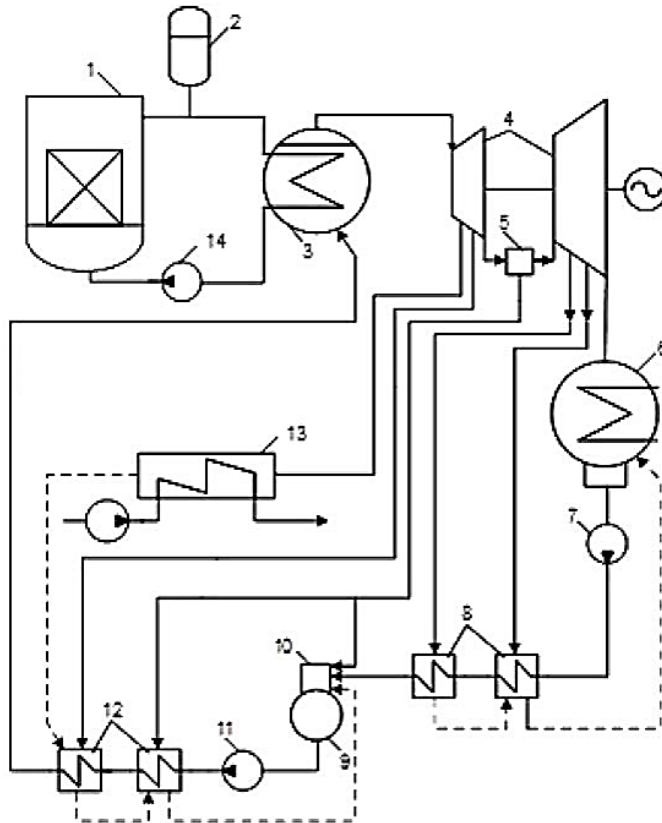


Рисунок 1.2 – Спрощена теплова схема енергоблока АЕС з реактором ВВЕР-1000: 1 – реактор; 2 – компенсатор об’єму; 3 – парогенератор; 4 – парова турбіна; 5 – турбінний сепаратор; 6 – конденсатор; 7 – конденсаторний насос; 8 – підігрівачі низького тиску; 9 – деаераторний бак; 10 – деаераторна колонка; 11 – живильний насос; 12 – підігрівачі високого тиску; 13 – мережевий підігрівач; 14 – циркуляційний насос

Технологічна структура першого контуру енергоблока АЕС (рис. 1.3) являє собою замкнену поточну систему, що включає:

- реакторну установку В-320;
- чотири парогенератори ПГВ-1000М (ПГ-1,2,3,4);
- головний циркуляційний трубопровід (ГЦТ);
- систему компенсації тиску в першому контурі.

### *Особливості технологічних процесів першого контуру*

Теплота, що виділяється всередині матриць тепловиділяючих елементів у результаті контрольованої та керованої ядерної реакції поділу ядер урану тепловими нейтронами, відводиться теплоносієм першого контуру, який циркулює під тиском через активну зону корпусу реактора.

Нагрітий у реакторі теплоносій надходить до вхідного колектора, розподіляється по трубках і, проходячи через них, передає свою теплоту воді, що знаходиться в міжтрубному просторі. Утворена при нагріванні живильної води насичена пара, проходячи з парового простору парогенератора через жалюзійний сепаратор, піддається сушінню, а потім через патрубки надходить до парового колектора.

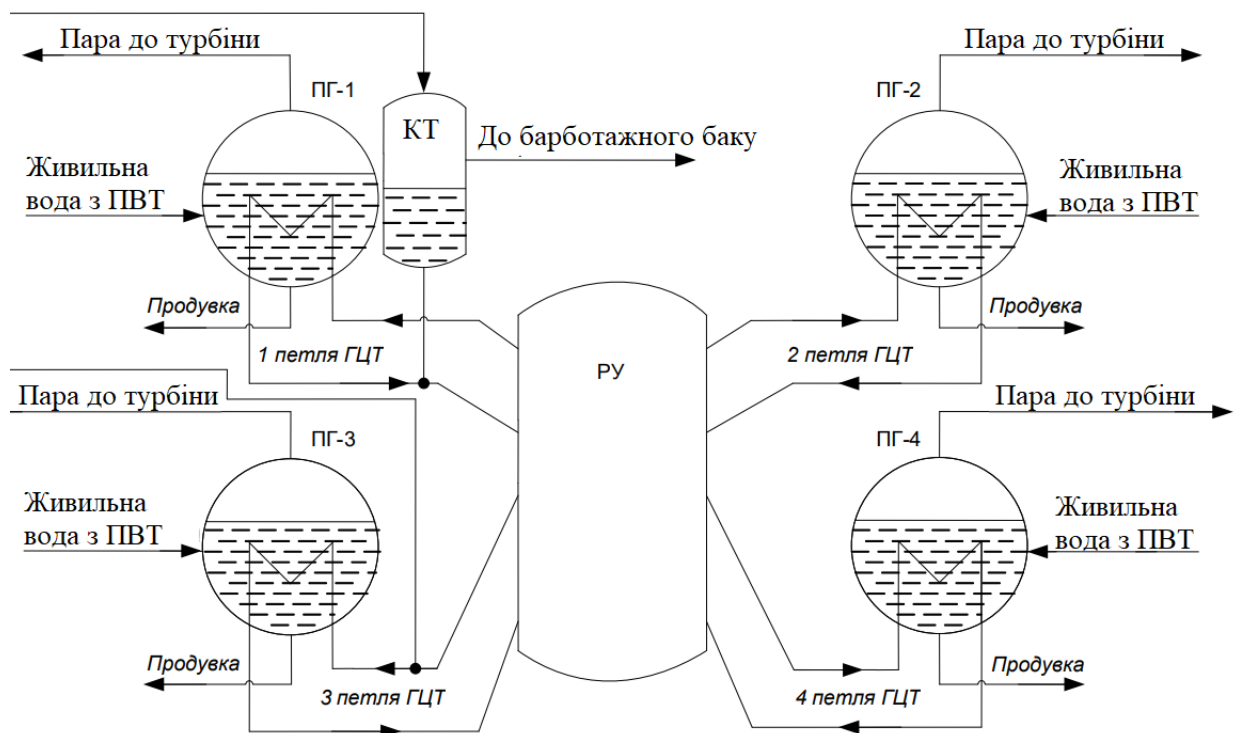


Рисунок 1.3 – Технологічна структура 1-го контуру енергоблока АЕС: РУ – реакторна установка; ПГ – парогенератор; ГЦТ – головний циркуляційний трубопровід; КТ – компенсатор тиску; ПВТ – підігрівач високого тиску.

При зміні середньої температури теплоносія першого контуру в перехідних режимах, пов'язаних із порушенням роботи обладнання, а також

при зміні навантаження, частина теплоносія перетікає з компенсатора в контур або з контуру в компенсатор через з'єднувальний трубопровід. Обмеження відхилень тиску від номінального значення досягається за рахунок стиснення або розширення парової подушки в компенсаторі. Водяний об'єм також бере участь у процесі компенсації тиску: при розширенні пари вода в компенсаторі тиску (КД) випаровується, сприяючи підтриманню тиску, а при стисненні парової фази відбувається конденсація на поверхні води, що обмежує зростання тиску.

При значному зростанні тиску через форсунки, розташовані у верхній частині КД, по лінії впорскування подається теплоносій з холодної нитки циркуляційного контуру для конденсації пари в паровій подушці. Подача «холодного» теплоносія уповільнює або повністю припиняє зростання тиску в першому контурі. При зниженні тиску вмикаються трубчасті електронагрівачі, розміщені під рівнем води в нижній частині КД.

Відомі такі програми регулювання потужності енергоблока:

- підтримання постійної середньої температури теплоносія першого контуру;
- підтримання постійного тиску пари у другому контурі;
- комбінована програма;
- компромісна програма.

Розглянемо їхні переваги та недоліки.

#### *Програма з постійною середньою температурою теплоносія першого контуру*

Переваги: забезпечує оптимальні умови для роботи обладнання першого контуру; дозволяє регулювати реактор через температурний ефект реактивності; стабілізує поле енерговиділення.

Недоліки: при зниженні потужності енергоблока тиск пари у другому контурі зростає, що вимагає проєктування парогенераторів і головних паропроводів для роботи при підвищеному тиску.

*Програма з постійним тиском пари у другому контурі*

Переваги: забезпечує оптимальні умови для роботи парогенеруючого обладнання другого контуру; дозволяє використовувати більш високі параметри пари перед турбіною в номінальному режимі.

Недоліки: зміни середньої температури теплоносія першого контуру вимагають більшого компенсатора тиску; виникають підвищені температурні напруги в корпусі реактора і оболонках ТВЕЛів; для компенсації реактивності за температурним коефіцієнтом потрібне втручання у органи регулювання СУЗ, що може змінити поле енерговиділення.

*Комбінована програма (постійний тиск у другому контурі при малих навантаженнях та постійна середня температура першого контуру при великих)*

Переваги: у маневрових режимах енергоблок працює головним чином за постійної температури теплоносія першого контуру; тиск пари у другому контурі залишається в допустимих межах навіть при значних відхиленнях.

Недоліки: підтримка постійної температури теплоносія під час маневрування у межах допустимого тиску парогенератора (62–64 бар) складна на практиці.

*Компромісна програма (помірна зміна середньої температури першого контуру та початкового тиску пари у другому)*

Переваги: дозволяє оптимально вибирати параметри для обох контурів.

Недоліки: при зниженні потужності зростає тиск пари другого контуру; потрібен більший компенсатор тиску; збільшуються температурні напруги в корпусі реактора і оболонках ТВЕЛів; для компенсації реактивності потрібне втручання у СУЗ, що може змінювати поле енерговиділення.

Схема регулювання потужності енергоблока з ВВЕР-1000 за комбінованою програмою показана на рис. 1.4.



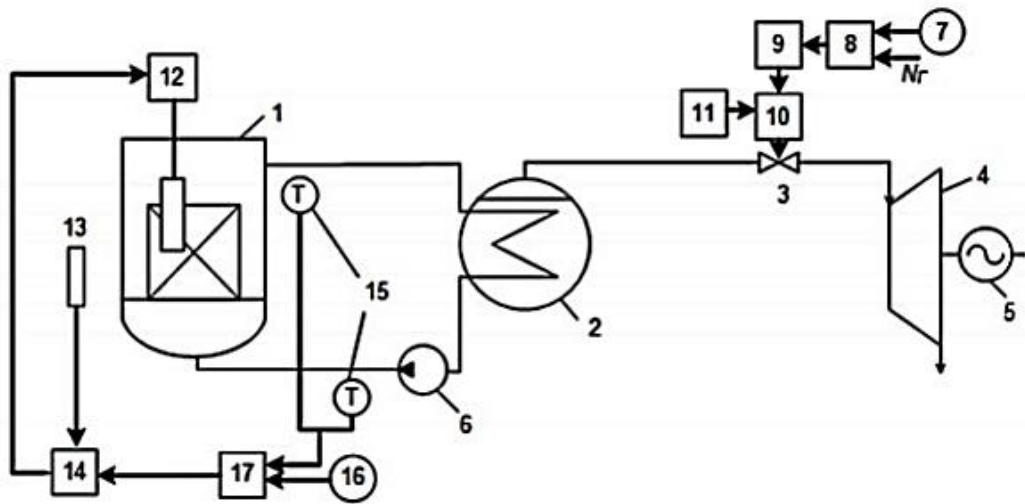


Рисунок 1.4 – Принципова схема регулювання потужності енергоблока з реактором ВВЕР-1000, яка реалізує комбіновану програму регулювання за великих навантажень: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – регулюючий клапан турбіни; 4 – турбіна; 5 – генератор; 6 – головний циркуляційний насос; 7 – задатчик електричної потужності генератора; 8 – регулятор потужності енергоблока; 9 – механізм управління турбіною; 10 – сервомотор; 11 – регулятор частоти обертання турбіни; 12 – приводи регулюючих стрижнів; 13 – іонізаційна камера; 14 – регулятор нейтронної потужності реактора; 15 – датчики температури теплоносія першого контуру; 16 – задатчик середньої температури теплоносія першого контуру; 17 – регулятор середньої температури теплоносія першого контуру

Регулювання здійснюється наступним чином: персонал задає бажане значення потужності за допомогою задатчика, після чого регулятор потужності формує команду для механізму управління турбіною. Сервомотор відкриває або закриває регулюючий клапан турбіни, змінюючи тиск пари перед турбіною та в парогенераторі. Це призводить до відповідної зміни тепловіддачі другим контуром і, як наслідок, зміни середньої температури теплоносія першого контуру.

Регулювання нейтронної потужності здійснює автоматичний регулятор потужності (АРП), що включає регулятор середньої температури першого

контур та регулятор нейтронної потужності. Сигнал від датчиків середньої температури та задатчика передається на регулятор, який коригує положення регулюючих стрижнів, забезпечуючи підтримання постійної середньої температури теплоносія першого контуру.

## **1.2 Огляд літератури та аналіз сучасних підходів до моніторингу температурного режиму в ядерних енергетичних установках**

У роботах [1, 2] досліджено вплив температурних флуктуацій у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000 на ефективність теплопередачі. У дослідженні використано методи кореляційного аналізу, які дозволили оцінити основні тенденції зміни температурного поля в залежності від експлуатаційних параметрів. Однак у роботах не розглянуто можливість застосування фрактально-кластерного підходу для більш глибокого аналізу структури температурного поля та прогнозування нештатних режимів роботи реактора, що може значно розширити можливості контролю.

Авторами в роботах [3, 4] проведено аналіз методів контролю температурного режиму першого контуру енергоблоків АЕС. Вивчено традиційні та сучасні підходи до моніторингу температурного поля, а також їхню інтеграцію в автоматизовані системи управління технологічним процесом. Однак автори сфокусувалися переважно на стандартних алгоритмах температурного контролю, не враховуючи складну нелінійну динаміку температурного поля та її вплив на теплогідравлічні характеристики першого контуру.

У дослідженнях [5, 6] розглянуто алгоритми прогнозування температурних відхилень у першому контурі АЕС на основі нейронних мереж. Результати показали ефективність такого підходу у виявленні небезпечних режимів роботи реактора. Проте в роботах відсутній аналіз кореляційних та фрактальних параметрів температурного поля, що може забезпечити більш точне прогнозування кризових явищ.

Авторами у роботах [7, 8] запропоновано використання спектрального аналізу температурних флуктуацій для оцінки теплогідравлічного стану першого контуру. Виявлено характерні частотні діапазони, що відповідають різним режимам роботи реакторної установки. Однак дослідження не враховують вплив кластерної структури температурного поля, що може містити додаткову інформацію про потенційні зони нестабільності та їхній розвиток.

У роботах [9, 10] було розглянуто питання стабільності теплових потоків у активній зоні реактора ВВЕР-1000. Запропоновано математичні моделі розподілу температури, що базуються на рівняннях теплопровідності. Проте авторами не було приділено уваги реальним експлуатаційним даним, що обмежує практичне застосування отриманих результатів.

Авторами у роботах [11, 12] проведено дослідження інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС. Описано основні принципи побудови та функціонування таких систем, зокрема в частині моніторингу температурних параметрів першого контуру. Однак методи аналізу температурних відхилень у дослідженнях зведені до стандартних алгоритмів без врахування новітніх підходів, таких як фрактальний аналіз або методи машинного навчання.

У роботах [13–15] досліджено методи фрактального аналізу для оцінки складних температурних процесів у теплогідравлічних системах. Автори розглянули можливості застосування фрактальної розмірності та методів багатомасштабного аналізу для виявлення відхилень у температурному полі. Зокрема, в роботі [16] проаналізовано поведінку температурних флуктуацій у ядерних реакторах та доведено, що структура теплопередачі має фрактальну природу. Однак у дослідженні не було адаптовано отримані результати для практичного використання в системах управління технологічними процесами на АЕС.

У дослідженнях [17, 18] запропоновано кластерний аналіз температурних відхилень у першому контурі реакторної установки.

Використано алгоритми машинного навчання для класифікації аномальних станів на основі температурних флуктуацій. Проте автори не розглянули питання інтеграції таких алгоритмів у програмно-технічні комплекси (ПТК) АСУ ТП, що є ключовим для їхнього практичного впровадження в системи управління реакторними установками.

Аналіз літературних джерел свідчить про значний інтерес до проблеми моніторингу температурного режиму першого контуру реакторних установок. Водночас більшість існуючих підходів зосереджені на традиційних методах контролю, які не враховують складну фрактально-кластерну структуру температурного поля. Це обмежує можливості точного прогнозування відхилень технологічних параметрів та своєчасного виявлення потенційно небезпечних режимів роботи реактора.

Виникає необхідність розробки нових методів аналізу температурних флуктуацій, що поєднують фрактально-кластерний, спектральний та кореляційний підходи. Особливо важливим є інтеграція цих методик у інформаційно-керуючі ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС. Це дозволить підвищити точність моніторингу, забезпечити своєчасне реагування на відхилення температурного поля та підвищити рівень безпеки експлуатації реакторних установок.

### **1.3 Проблеми виявлення аварійних режимів теплопередачі в першому контурі енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000**

Енергоблоки з реактором типу ВВЕР-1000 використовують двоконтурну систему: в першому контурі теплоносієм (вода-охолоджувач) циркулює через активну зону реактора, потім через головні циркуляційні насоси (ГЦН), гарячі і холодні трубопроводи, далі віддає тепло теплообміннику (парогенератору) і повертається в активну зону.

У нормальному режимі забезпечується стабільна передача тепла з першого контуру в другий – витрата теплоносія, перепад температур на

вході/виході, температура на гарячій і холодній магістралі, теплообмін на парогенераторі.

Однак ця схема має кілька особливостей, які ускладнюють контроль:

- чотири петлі першого контуру (типова конфігурація ВВЭР-1000) приводять до можливості асиметричних режимів (одна петля працює не так, як інші);

- велика маса та інерція теплоносія, трубопроводів, теплообмінників – режим змінюється не миттєво, але сигнали відхилень можуть бути «згладжені»;

- наявність складного гідравлічного і теплогідравлічного взаємозв'язку: витрата, температурний перепад, стан поверхні теплообміну, корозія, засмічення, а також нейтронні/теплові зворотні зв'язки через активну зону;

- пристрої моніторингу (датчики температури, витрати, тиску) піддаються впливу умов першого контуру, які дуже агресивні: температура, тиск, можливе накопичення радіоактивності, старіння обладнання.

Для першого контуру ВВЭР-1000 можна виділити декілька ключових типів порушень, які безпосередньо впливають на процес теплопередачі:

- зниження циркуляції теплоносія – наприклад, відмова одного чи більше ГЦН, часткове або повне блокування трубопроводів, засувки, засмічення системи. Внаслідок – менша масова витрата, зниження теплопередачі, підвищення температури в активній зоні.

- асиметричність витрати чи температури – коли одна петля має іншу витрату чи температурний режим, ніж інші; це може призвести до локального погіршення теплопередачі. Наприклад, у дослідженні для ВВЭР-1000 одна з петель мала «зворотній потік».

- зниження ефективності теплообміну з парогенератором – надто великі відклади на трубах, корозія, погіршення контакту між теплоносієм і поверхнею теплообміну.

– порушення умов експлуатації/зносу обладнання – наприклад, зменшення товщини стінок, утворення ерозійних чи кавітаційних ушкоджень, зміни гідравлічних характеристик, що ускладнюють моніторинг нормативних параметрів.

– несподівані транзитивні режими – такі як запуск/зупинка насоса, переходи на змінне навантаження, випадки реверсування потоку, які можуть призвести до короткочасного погіршення теплопередачі або порушення стаціонарного режиму.

Виявлення вищезгаданих порушень супроводжується значними труднощами, які можна згрупувати так:

– інерційність і недостатня роздільна здатність вимірювальної системи: коли параметр порушення (наприклад, масова витрата теплоносія) змінюється швидко чи локально, існуючі датчики можуть не фіксувати ці зміни або роблять це із затримкою.

– складність локалізації відхилення: наприклад, якщо одна з петель зменшила витрату, це може не відразу суттєво вплинути на середні показники першого контуру, але локально теплопередача погіршується.

– нормальний дрейф і деградація обладнання як фонові зміни параметрів: знос, корозія, утворення відкладень – все це змінює базові характеристики системи з часом. Через це «норма» сама по собі переміщується, і відхилення можуть бути приховані.

– мультипараметричність і кореляції: режим теплопередачі залежить одночасно від витрати теплоносія, температурного перепаду, стану поверхні теплообміну, гідравліки, геометрії потоку, нейтронно-теплових зворотних зв'язків. Просте відхилення одного параметра (наприклад, температури) без урахування інших може бути недостатнім для достовірного виявлення аварійного режиму.

– слабка достовірність моделей і методів аналізу у нестандартних ситуаціях: при аналізі асиметричних чи транзитивних режимів (запуск

насоса, зворотні потоки, зміни навантаження) системні моделі (наприклад, гідравлічні/теплогідравлічні моделі) можуть давати неточні результати.

– обмеженість в реальному часі моніторингу та аналітики: часто системи контролю мають налаштовані межі спрацювання (тригери), але не обов'язково мають алгоритми раннього попередження, які б здатні враховувати багатовимірні зміни параметрів до того, як режим перетне критичну межу.

– вплив людського фактору та процедурних обмежень: наприклад, оператори можуть не бачити ранніх ознак нерівномірності витрати чи температури, або існуючі процедури не передбачають достатньо частого або високоточного моніторингу тих параметрів, які могли б попередити аварійний режим.

– належність до ядерної безпеки і суворі вимоги: будь-яке відхилення має потенційно серйозні наслідки, тому поріг для реагування дуже низький – це створює ситуацію, коли потрібно раннє і достовірне виявлення, але з великою кількістю помилкових/неістотних тривог (що теж негативно).

У дослідженні [8], присвяченому локальній блокаді потоку в каналі реактора типу ВВЕР-1000, вказано, що локальна блокада до 70 % поперечного перетину каналу не призводила до суттєвого пошкодження, але при блокаді понад 95 % зміни були серйозними – і що ця ситуація практично не діагностується до значного розвитку.

У межах заходу V1000СТ-1 (для ВВЕР-1000) було досліджено запуск насоса при трьох працюючих нас. і одна петля зворотним потоком: зміни масової витрати, температурного перепаду і розподілу реактивності були суттєвими.

У дослідженнях деградації теплообмінних трубок у парогенераторах ВВЕР [5, 17] вказано, що корозія, стеснений простір на опорах трубок та інші фактори впливають на ефективність теплообміну, що є фоновим фактором, який ускладнює відокремлення «нормальної» експлуатації від початку аварійного режиму.

Якщо аварійний режим теплопередачі не буде виявлений вчасно або буде реаговано із запізненням, можливі такі наслідки:

- підвищення температури теплоносія в активній зоні, зниження запасу теплоносія, погіршення охолодження активної зони – що може призвести до ушкодження тепловиділяючих елементів або до порушення теплового балансу реактора.

- порушення нормального режиму реактора, зростання ризику появи режимів із відходом від кипіння (Departure from Nucleate Boiling, DNB) чи критичного теплового перевантаження.

- погіршення ефективності систем відводу тепла другого контуру, або руйнування/пошкодження парогенератора чи трубопроводів – що призводить до необхідності планового/аварійного простою, підвищення витрат на ремонт.

- збільшення навантаження на системи безпеки та аварійного захисту: якщо погіршення теплопередачі триває, системи аварійного охолодження активної зони можуть бути задіяні частіше, що може зменшити їхній ресурс або вплинути на надійність реакторного блоку.

- зниження рівня безпеки підприємства в цілому, підвищення ризику аварій з викидом радіоактивності чи зупинкою енергоблоку.

- збільшення витрат на експлуатацію, ремонти, можливі штрафні санкції чи тривалі простої – що негативно впливає на економічну ефективність станції.

Для підвищення ефективності виявлення аварійних режимів теплопередачі першого контуру на ВВЕР-1000 корисно врахувати такі напрями:

1. Інтеграція мультипараметричного моніторингу: одночасний контроль витрати теплоносія, температур на вході/виході, перепаду температур, гідравлічних показників (тиску, профілю витрати) і стану поверхні теплообміну (наприклад, за допомогою неруйнівного контролю відкладів).



2. Використання алгоритмів раннього попередження, які аналізують динаміку змін параметрів, а не лише перевищення порогових значень (тобто встановлення трендів, кореляцій).

3. Регулярний контроль і врахування деградації обладнання: знос трубопроводів, зміни гідравліки, утворення відкладень на теплообмінниках – це має бути закладено у базову лінію, щоб мати можливість відрізнити «дозволену» зміну від критичної.

4. Акцент на локалізацію аномалій: наприклад, окремо моніторинг кожної петлі першого контуру (температура, витрата), так як середні значення можуть приховувати відхилення в одній петлі.

5. Реєстрація і аналіз нетипових, транзитивних режимів (запуск/зупинка насоса, зміни навантаження, реверс потоку) з використанням сценаріїв, прописаних у процедурній документації станції.

6. Вдосконалення моделей теплогідравліки і їх верифікація за допомогою тестових даних (наприклад, як у проектах типу V1000СТ) для більш точного прогнозування поведінки системи при нестандартних режимах.

7. Підвищення частоти та якості неруйнівного контролю обладнання (трубопроводи, теплообмінники) – корозія, ерозія, кавітація, відкладення негативно впливають на теплопередачу.

8. Підготовка персоналу та процедур: своєчасна реакція на тривожні сигнали, аналіз трендів, ухвалення рішення про втручання ще до настання серйозного режиму.

Проблеми виявлення аварійних режимів теплопередачі в першому контурі енергоблоку з ВВЕР-1000 мають багатогранний характер: вони обумовлені як технічними (інструментальні обмеження, складність гідравліки), так і організаційно-експлуатаційними (деградація обладнання, тренди змін, процедурні питання). Водночас, раннє виявлення і коректна діагностика таких режимів є ключовою складовою забезпечення безпеки і ефективності експлуатації АЕС.



## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Технологічна структура першого контуру енергоблока АЕС являє собою складну замкнену систему, у якій реалізуються взаємопов'язані процеси теплообміну, циркуляції та регулювання тиску. Особливістю є висока інерційність гідравлічних процесів і необхідність підтримання стабільного температурно-теплогідравлічного балансу, що визначає ефективність і безпеку експлуатації реактора.

Аналіз сучасних підходів до моніторингу температурного режиму показав, що більшість існуючих методик базується на традиційних алгоритмах контролю, які не враховують складну фрактально-кластерну структуру температурного поля. Це обмежує можливості своєчасного виявлення відхилень і прогнозування аварійних режимів. Перспективним напрямом є поєднання фрактального, кореляційного та спектрального аналізу з методами машинного навчання для підвищення точності прогнозування.

Проблеми виявлення аварійних режимів теплопередачі у першому контурі ВВЕР-1000 зумовлені як технічними, так і експлуатаційними факторами. До основних належать інерційність системи, складність локалізації відхилень, деградація обладнання, мультипараметричність процесів та недостатня ефективність існуючих систем діагностики.

Для забезпечення надійного моніторингу і раннього виявлення відхилень необхідна інтеграція мультипараметричного аналізу, алгоритмів прогнозування, локальної діагностики кожної петлі першого контуру та врахування деградаційних процесів у теплогідравлічному обладнанні.

Впровадження сучасних інформаційно-керуючих систем з елементами інтелектуального аналізу даних (штучні нейронні мережі, кластеризація, фрактальний аналіз) дозволить підвищити точність, швидкість і достовірність моніторингу температурного режиму, що, своєю чергою, сприятиме підвищенню рівня безпеки та ефективності експлуатації енергоблоків АЕС.

## **РОЗДІЛ 2. ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ**

### **2.1 Ключові точки контролю температурного режиму з урахуванням фрактально-кластерної структури теплоносія**

Контроль температури теплоносія першого контуру є критично важливим, оскільки температурне поле цього середовища має фрактальну структуру з локальними зонами теплових неоднорідностей. Ці кластери температурних флуктуацій визначають ефективність теплопередачі від тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) до парогенераторів і впливають на стабільність теплогідравлічних процесів у реакторній установці. Врахування фрактально-кластерних особливостей розподілу температури дозволяє точніше оцінювати ризики криз тепловіддачі та перегріву активної зони, що є ключовим для забезпечення безпеки обладнання, зокрема корпусу реактора, трубопроводів і парогенераторів.

Для ефективного моніторингу та управління температурним режимом першого контуру необхідно не лише встановлювати номінальні та допустимі значення температури, а й аналізувати структуру теплових кластерів, що утворюються в системі. Визначення точок контролю має ґрунтуватися на просторовій кластеризації температурних відхилень, що дозволяє оптимізувати вибір датчиків та вдосконалити методи і алгоритми вимірювання, обробки та аналізу даних.

Основні вимоги до температурного режиму першого контуру енергоблоку ВВЕР-1000 регламентуються жорсткими нормативами, які базуються на проєктній документації та стандартах безпеки (табл. 2.1). Однак, врахування фрактальних характеристик температурного поля дозволяє не лише контролювати окремі точки, а й прогнозувати поведінку теплогідравлічної системи на основі аналізу масштабної самоподібності температурних змін.

При перевищенні температури  $336^{\circ}\text{C}$  або її зниженні нижче  $304^{\circ}\text{C}$  інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС автоматично ініціює заходи для стабілізації процесу, враховуючи не тільки локальні показники, але й просторово-часову динаміку змін температурного поля.

Оскільки теплоносій циркулює через різні етапи системи, його температура змінюється не лінійно, а формує динамічні фрактальні структури, які потребують моніторингу в кількох ключових точках. Впровадження фрактально-кластерного підходу дозволяє підвищити точність контролю та оперативність реагування, що є критично важливим для стабільної та безпечної роботи енергоблоку АЕС.

Таблиця 2.1 – Номінальні та граничні значення температури теплоносія

| Параметр                                         | Значення, $^{\circ}\text{C}$                          |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Номінальна температура на виході з активної зони | $320^{\circ}\text{C}$                                 |
| Допустиме відхилення від номіналу                | $\pm 5\%$ ( $304\text{--}336^{\circ}\text{C}$ )       |
| Температура на вході у реактор                   | $\approx 290\text{--}295^{\circ}\text{C}$             |
| Гранична температура для безпечної експлуатації  | $340^{\circ}\text{C}$                                 |
| Температура початку криз тепловіддачі            | $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$ (локально у ТВЕЛax) |
| Критична температура аварійного стану            | $>1200^{\circ}\text{C}$ (плавлення оболонок ТВЕЛів)   |

Основним місцем вимірювання температури є вихід теплоносія з активної зони реактора, оскільки саме цей показник визначає рівень тепловиділення у паливних елементах. З позиції фрактально-кластерного аналізу, розподіл температури в цій області може мати самоподібну структуру, а локальні неоднорідності можуть формувати температурні кластери, що сигналізують про зміну умов теплопередачі. Температура на

виході повинна залишатися в межах  $320^{\circ}\text{C} \pm 5\%$ , оскільки перевищення цього значення може свідчити про формування високотемпературних кластерів, які викликають перегрів ТВЕЛів, а зниження – про порушення рівномірності тепловиділення. Датчики у цій зоні встановлюються у вихідних патрубках колектора реактора, зазвичай у кожній із чотирьох циркуляційних петель, що дозволяє ідентифікувати просторову структуру температурного поля.

Другим важливим місцем вимірювання є вхід теплоносія у реактор, розташований після парогенераторів. Згідно з фрактальним підходом, ефективність теплообміну між першим і другим контурами може бути описана через динаміку кластерів охолодження. Якщо температура на вході перевищує  $300^{\circ}\text{C}$ , це може свідчити про недостатнє охолодження у парогенераторах, що призводить до зменшення температурного градієнта та погіршення циркуляції теплоносія. Якщо температура падає нижче  $285^{\circ}\text{C}$ , це може бути ознакою надмірної дисперсії температурного поля, що негативно впливає на ефективність пароутворення та роботу турбіни.

Температура контролюється також у зонах роботи головних циркуляційних насосів (ГЦН), які забезпечують переміщення теплоносія між температурними кластерами системи. Відповідність температури у цій зоні номінальним значенням підтверджує стабільність циркуляційного процесу. Якщо температура перевищує  $310^{\circ}\text{C}$ , це може сигналізувати про зменшення ефективності циркуляції через формування стоячих температурних хвиль або локальних зон застою. Якщо ж температура падає нижче  $285^{\circ}\text{C}$ , може мати місце надмірне охолодження певних кластерів теплоносія, що порушує рівномірність теплопередачі та впливає на загальну ефективність реактора.

Додаткові контрольні точки розташовані у трубопроводах першого контуру, де вони дозволяють аналізувати просторову фрактальність теплопередачі. Виявлення локальних відхилень температури від номінальних значень свідчить про нерівномірний розподіл теплоносія або проблеми у теплообмінниках, які можуть формувати довготривалі теплові кластери, що впливають на загальний баланс енергосистеми реактора.

Окрему увагу приділяють вимірюванню температури усередині активної зони реактора, де знаходяться паливні елементи, що генерують тепло. Внутрішньоактивні датчики дозволяють аналізувати динаміку фрактальних змін температури ТВЕЛів, що забезпечує найточніші дані щодо стабільності тепловиділення. Якщо температура у паливних збірках перевищує  $600^{\circ}\text{C}$ , починається криза тепловіддачі, що означає формування критичних теплових кластерів, здатних спричинити локальні аварійні ситуації. Якщо температура досягає  $1200^{\circ}\text{C}$ , можлива деструкція оболонок паливних елементів, що є загрозою для безпеки енергоблоку.

Таким чином, контроль температури теплоносія здійснюється у п'яти ключових точках:

- на виході з активної зони – оцінка тепловиділення та формування температурних кластерів;
- на вході у реактор – аналіз ефективності теплообміну;
- у головних циркуляційних насосах – контроль рівномірності циркуляції теплоносія;
- у трубопроводах першого контуру – виявлення просторових відхилень температури.
- у паливних збірках – моніторинг критичних температур ТВЕЛів.

Запровадження фрактально-кластерного аналізу дозволяє отримати не лише статичну картину температурних показників, а й оцінити їхню динамічну змінність, що сприяє підвищенню точності контролю та швидкості реагування на відхилення, забезпечуючи стабільну та безпечну роботу енергоблоку АЕС.

## **2.2 Інтелектуальна обробка даних температурних датчиків в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС**

Для вимірювання температури теплоносія у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000 використовується комплексна система

датчиків, до складу якої входять термоперетворювачі опору (ТПО) та термopари. Вибір конкретного типу датчиків та їх розташування здійснюється з урахуванням фрактально-кластерного аналізу температурних флуктуацій, що дозволяє ідентифікувати зони локальних неоднорідностей та оцінювати динаміку теплопередачі в системі. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС використовує отримані температурні дані для автоматизованого контролю та коригування параметрів теплоносія з метою підтримання стабільності реакторної установки. Термоперетворювачі опору працюють за принципом зміни електричного опору металевого провідника (зазвичай платини) при зміні температури, що дозволяє отримувати високоточні дані про стан теплоносія у ключових точках реакторного циклу. Чутливість ТПО до незначних температурних відхилень робить їх особливо ефективними для моніторингу зон, де важливим є точне відстеження теплових градієнтів. Термopари, що базуються на термоелектричному ефекті, дозволяють швидко фіксувати миттєві зміни температури, що є критично важливим для виявлення криз тепловіддачі та запобігання локальним перегрівам. Поєднання цих двох типів датчиків у контрольній системі забезпечує комплексний підхід до вимірювання температури теплоносія, дозволяючи не лише отримувати дані у режимі реального часу, а й прогнозувати можливі відхилення на основі виявлення закономірностей у зміні температурного поля. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП аналізує динаміку розподілу теплових кластерів у першому контурі та адаптує параметри циркуляції теплоносія для забезпечення оптимальних умов експлуатації реактора. Важливим аспектом цього підходу є можливість виявлення самоподібних структур у температурному полі, що дозволяє прогнозувати розвиток критичних ситуацій ще до їх фактичного настання. Формування стійких теплових кластерів може вказувати на порушення циркуляції або зміну характеристик теплообміну, що потребує оперативного коригування параметрів теплоносія. Використання фрактального аналізу температурного поля у поєднанні з



автоматизованими алгоритмами ПТК АСУ ТП дає змогу покращити точність моніторингу, оптимізувати роботу енергоблоку та підвищити загальний рівень безпеки ядерної установки.

Залежність опору від температури для платинових датчиків, з урахуванням фрактальної корекції виражається формулою (2.1):

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha T) \cdot \left( \frac{1}{D_f} \right)^\mu, \quad (2.1)$$

де:  $R(T)$  – електричний опір при температурі  $T$ ;  $R_0$  – номінальний опір при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (для платини  $\alpha \approx 0,00385$   $1/^\circ\text{C}$ );  $D_f$  – фрактальна розмірність температурного поля, яка враховує нерівномірний розподіл температури у контрольних точках;  $\mu$  – коефіцієнт, що регулює вплив фрактальної розмірності на зміну опору.

У штатному режимі циркуляції теплоносія система є максимально стабільною, а температурні флуктуації рівномірно розподілені, тому  $D_f = 3$ , що приводить коефіцієнт коригування до  $(1/3)^\mu$ .

При відхиленні від норми (локальні порушення циркуляції, кризи тепловіддачі, нерівномірне розсіювання тепла) фрактальна розмірність зменшується, що збільшує значення коригуючого множника, впливаючи на опір і дозволяючи інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП фіксувати нестабільності у розподілі температури.

Якщо, наприклад, через порушення циркуляції теплоносія формується локальний перегрів, то  $D_f$  може зменшитися до 2.5 або нижче, що підвищить коефіцієнт корекції й сигналізуватиме про відхилення значень температурного поля.

Основні типи ТПО, що використовуються у ВВЕР-1000 це Pt100 – номінальний опір 100 Ом при  $0^\circ\text{C}$ , висока точність ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ),

використовується у трубопроводах першого контуру та Pt1000 – номінальний опір 1000 Ом при 0°C, вища чутливість у порівнянні з Pt100, застосовується у місцях, де потрібне швидке реагування на зміну температури.

ТПО характеризуються високою точністю вимірювань та стабільністю характеристик у часі, що робить їх важливим елементом системи контролю температури теплоносія у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000. Проте, їхня реакція на зміни температури є відносно повільною, а механічна чутливість обмежує їх застосування в умовах підвищених динамічних навантажень. У межах фрактально-кластерного підходу температурне поле першого контуру розглядається як складна самоподібна структура, що складається з локальних температурних кластерів, які можуть змінюватися в просторі та часі. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС використовує ці особливості для вибору оптимальних точок вимірювання, що забезпечує максимальну точність та ефективність моніторингу теплогідравлічних процесів.

Термопари працюють на основі термоелектричного ефекту Зеебека, згідно з яким при контакті двох різнорідних металів у замкненому контурі виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна температурному градієнту між гарячим та холодним спаєм. Це явище описується рівнянням:

$$U = S(T_1 - T_2), \quad (2.2)$$

де:  $U$  – термо-ЕРС (мВ);  $S$  – коефіцієнт термоелектричної чутливості (для типу К  $\sim 41$  мкВ/°C),  $T_1, T_2$  – температури гарячого та холодного спаю.

У реакторній установці ВВЕР-1000 застосовуються два основні типи термопар: типу К (Хромель-Алюмель), що працюють у діапазоні від  $-200^\circ\text{C}$  до  $+1300^\circ\text{C}$  для контролю температури у першому контурі, та типу В (Платина-Родій) із діапазоном від  $600^\circ\text{C}$  до  $1800^\circ\text{C}$  для вимірювання температури у внутрішньоактивній зоні реактора. Фрактально-кластерний підхід дозволяє аналізувати динаміку розподілу теплових потоків у

реакторній установці, виділяючи зони підвищеної турбулентності та потенційних криз тепловіддачі.

Термопары мають широкий діапазон вимірювань, здатні швидко реагувати на локальні зміни температурного поля та витримують екстремальні умови, зокрема високий рівень радіації та тиску. Це робить їх незамінними для моніторингу критичних зон, таких як активна зона реактора, вихід ТВЕЛів та області з потенційним перегрівом. Проте їхня точність є нижчою порівняно з ТПО (похибка  $\pm 1-2^{\circ}\text{C}$ ), а також вони зазнають часової деградації через дифузійні процеси у металах та потребують компенсаційних дротів для точних вимірювань.

Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС інтегрує дані від обох типів датчиків, застосовуючи алгоритми обробки, що враховують фрактальну структуру теплових процесів. Це дозволяє не лише проводити моніторинг, а й прогнозувати можливі критичні стани, такі як локальні перегріви або нерівномірний розподіл температурних кластерів у першому контурі. Такий підхід забезпечує підвищену безпеку та стабільність роботи реакторної установки, дозволяючи швидко реагувати на відхилення та оптимізувати режими роботи енергоблоку. Зрівняльна характеристика ТПО та термопар представлена в таблиці 2.2.

Аналіз даних із табл. 2.2 дозволяє зробити висновок, що ТПО найбільш ефективні у зонах, де критично важлива висока точність та довготривала стабільність вимірювань, зокрема у трубопроводах першого контуру, де необхідно контролювати рівномірність теплопередачі. Водночас термопары, завдяки своїй стійкості до екстремальних температур і жорстких умов експлуатації, оптимально підходять для зон із високими термічними навантаженнями, таких як активна зона реактора та вихідні патрубки ТВЕЛів, де можливе утворення локальних перегрівів.

Таблиця 2.2 – Порівняння ТПО та термопар

| Характеристика        | ТПО (Pt100, Pt1000)                  | Термопари (K, B)                                       |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Принцип роботи        | Зміна електричного опору             | Термоелектричний ефект                                 |
| Точність              | Висока ( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) | Середня ( $\pm 1-2^{\circ}\text{C}$ )                  |
| Діапазон температур   | До $600^{\circ}\text{C}$             | До $1800^{\circ}\text{C}$                              |
| Час реакції           | Відносно повільний                   | Швидкий                                                |
| Стійкість до радіації | Середня                              | Висока                                                 |
| Використання          | Трубопроводи, контурні системи       | Внутрішньоактивні вимірювання, високотемпературні зони |

У межах фрактально-кластерного підходу контроль температури у реакторних установках ВВЕР-1000 розглядається як багаторівневий процес, у якому температура теплоносія та елементів конструкції формується як динамічна система теплових кластерів. ТПО дозволяють фіксувати довготривалі температурні зміни, що характеризують загальну стабільність циркуляції теплоносія, тоді як термопари реагують на швидкоплинні теплові флуктуації, що виникають унаслідок локальних змін теплового навантаження.

Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС інтегрує показники обох типів датчиків, використовуючи алгоритми фрактального аналізу температурного поля для виявлення самоподібних структур теплових відхилень. Це дозволяє не тільки отримувати поточну інформацію про температурний стан системи, а й прогнозувати можливі аварійні стани, такі як локальні кризи тепловіддачі або нерівномірне розподілення циркуляційних потоків.

### 2.3 Алгоритм фрактально-кластерного аналізу температурного поля в системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС

Вимірювання температури теплоносія у першому контурі є лише першим етапом багаторівневої системи контролю. Отримані значення температури не просто передаються в систему управління, а проходять багатоступеневу обробку та аналіз в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, що включає:

- первинну фільтрацію для усунення шумів та врахування похибок датчиків;
- фрактально-кластерний аналіз для ідентифікації аномальних температурних зон та визначення масштабів теплових неоднорідностей.
- адаптивну корекцію технологічних параметрів циркуляції теплоносія залежно від виявлених теплових кластерів.
- прогнозування можливих відхилень на основі аналізу динаміки температурних змін у просторі та часі.

Впровадження цього підходу дозволяє не тільки підвищити точність контролю температури, а й забезпечує прогнозно-адаптивне керування тепловими процесами у першому контурі, що є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям та стабільної експлуатації енергоблоку АЕС. Блок-схема алгоритму цього процесу представлений на рис. 2.1.

**Етап 1:** Аналогово-цифрове перетворення (АЦП) та калібрування сигналів

На першому етапі контролю температури здійснюється збір та передача даних в інформаційно-керуючу систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, що є ключовим для аналізу теплових процесів у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000. Температурні параметри надходять у систему моніторингу реактора (СМР) від датчиків. Це дозволяє зафіксувати як

глобальні температурні зміни, так і локальні відхилення, що формуються у вигляді теплових кластерів у різних точках циркуляційного контуру.



Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритму обробки інформації в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС

Вимірювання передаються по спеціалізованих сигнальних лініях у вигляді аналогових або цифрових сигналів залежно від типу датчиків. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС забезпечує їх першочергову фільтрацію, усуваючи випадкові похибки та коригуючи

значення відповідно до алгоритмів фрактального згладжування, що дозволяє виявляти закономірності у зміні температурного поля.

Усі отримані значення передаються у систему реєстрації та аналізу параметрів (СРАР), яка виконує попередню перевірку коректності вимірювань, визначаючи рівень узгодженості отриманих даних із розрахунковими моделями теплогідравлічних процесів. Якщо система виявляє позаштатні температурні кластери або самоподібні структури відхилень, ці дані передаються на детальну фрактальну обробку, що дозволяє оцінити потенційні ризики аварійних станів у першому контурі.

Таким чином, перший етап є не просто збором інформації, а й інтелектуальним аналізом температурних даних, що забезпечує точність вимірювань та формування адаптивних рішень для подальшого керування тепловими процесами реакторної установки енергоблоку ВВЕР-1000.

**Етап 2:** Аналогово-цифрове перетворення (АЦП) та калібрування сигналів.

На другому етапі здійснюється аналогово-цифрове перетворення (АЦП) та калібрування сигналів, що є важливим процесом у інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС. Оскільки більшість датчиків передають аналогові сигнали (напругу, струм або зміни опору), їх необхідно підготувати та перетворити у цифровий формат для подальшого аналізу та обробки.

Для датчиків, що видають сигнал напруги (наприклад термопари), сигнал попередньо підсилюється, лінеаризується та може бути перетворений у струмовий сигнал 4-20 мА для підвищення завадостійкості при передачі даних. Датчики з вихідним струмовим сигналом (4-20 мА) підключаються через шунтовий резистор для отримання напруги, придатної для оцифрування.

Аналогово-цифрове перетворення здійснюється за формулою (2.3):

$$V_{dig} = \frac{V_{an} \cdot 2^N}{V_{ref}}, \quad (2.3)$$

де  $V_{dig}$  – цифрове значення сигналу;  $V_{an}$  – отримане аналогове значення;  $V_{ref}$  – референсна напруга АЦП;  $N$  – розрядність АЦП (16-24 біти).

У стабільному режимі теплопередачі та циркуляції теплоносія температурне поле є однорідним, і  $D_f = 3$ . У цьому випадку отримані цифрові значення використовуються без додаткової корекції.

При виникненні локальних відхилень (неоднорідностей) температури (перегрів, порушення циркуляції, криза тепловіддачі)  $D_f$  зменшується, що вказує на підвищену неоднорідність температурного розподілу. Це враховується на етапі цифрової обробки сигналу шляхом введення коригуючої функції:

$$V_{digC} = V_{dig} \cdot f(D_f, \xi), \quad (2.4)$$

де  $V_{digC}$  – скориговане значення після аналізу неоднорідності температурного поля;  $f(D_f, \xi) = 1 + \xi(3 - D_f)$  – функція корекції, що визначає рівень впливу температурної неоднорідності на точність вимірювання;  $\xi$  – емпіричний коефіцієнт, що визначає ступінь впливу неоднорідності на точність вимірювань. Типові значення  $\xi$  можуть бути в межах  $0.1 \div 0.5$  залежно від рівня чутливості системи до змін температури.

Розрядність 16-24 біти для аналогово-цифрового перетворення використовується на АЕС через такі причини:

1. Висока точність вимірювань  
– 16 біт означає, що сигнал може бути представлений у 65 536 рівнях ( $2^{16}$ );



– 24 біти дають 16 777 216 рівнів, що дозволяє зчитувати навіть мінімальні зміни температури, особливо важливі для аналізу температурних флуктуацій.

Для АЕС, де критично важливе точне вимірювання температури, тиску та інших параметрів, використання 12-бітних АЦП (4096 рівнів) є недостатнім.

## 2. Робота з малими сигналами

– деякі датчики (наприклад, термопари) видають дуже слабкі сигнали (від мікр вольт до мілівольт);

– висока розрядність дозволяє більш точно зчитувати такі малі напруги.

## 3. Компенсація шумів та дрейфу

– на АЕС є значний рівень електромагнітних перешкод (від насосів, генераторів, силового обладнання);

– використання високорозрядних АЦП (18-24 біти) з вбудованими фільтрами дозволяє мінімізувати вплив шумів.

## 4. Широкий динамічний діапазон

– датчики можуть працювати в дуже різних умовах (від кімнатної температури до сотень градусів);

– чутливість при цьому не повинна втрачатися – що й забезпечується 24-бітним АЦП.

Таким чином, на даному етапі, урахування фрактальної розмірності при аналогово-цифровому перетворенні дозволяє інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС не просто отримувати дані про температуру, а й аналізувати їхню структурну неоднорідність, що є критично важливим для прогнозування кризових станів у першому контурі та забезпечення стабільної та безпечної експлуатації енергоблоку АЕС.

**Етап 3:** Фільтрація шумів та компенсація похибок температурних вимірювань.

У процесі вимірювання температури теплоносія першого контуру в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС можуть

виникати похибки, спричинені електромагнітними завадами, тепловим дрейфом датчиків, механічними вібраціями та імпульсними стрибками напруги. Оскільки температурне поле реактора має фрактально-кластерну структуру, його неоднорідність безпосередньо впливає на точність вимірювань.

Для усунення випадкових флуктуацій та стабілізації температурних даних застосовується *фільтр Калмана*, який дозволяє згладжувати показники з урахуванням фрактальної розмірності температурного поля. Оновлене оцінене значення температури розраховується за формулою (2.5):

$$T_k = T_{k-1} + K_k (Z_{meas} - T_{k-1}), \quad (2.5)$$

де  $T_k$  – скориговане значення температури;  $T_{k-1}$  – прогнозоване значення перед оновленням;  $K_k$  – коефіцієнт Калмана, що визначає вагу вимірюного значення;  $Z_{meas}$  – фактичне виміряне значення датчиком.

Коефіцієнт Калмана коригується з урахуванням фрактальної неоднорідності температурного поля обчислюється за формулою (2.6):

$$K_k = \frac{P_{k-1}}{P_{k-1} + R} \cdot (1 + \lambda(3 - D_f)), \quad (2.6)$$

$P_{k-1}$  – дисперсія прогнозу;  $R$  – дисперсія шуму вимірюваного параметра;  $D_f$  – фрактальна розмірність температурного розподілу;  $\lambda$  – це коефіцієнт чутливості, який визначає, наскільки сильно зміна фрактальної розмірності  $D_f$  впливає на відповідну функцію (для фільтра Калмана:  $\lambda \approx 0.1 \div 0.5$ ).

Якщо  $D_f < 3$  (зростає неоднорідність), множник  $1 + \lambda(3 - D_f)$  збільшує вагу вимірюного значення, що дозволяє швидше реагувати на зміни. Крім

того, при зменшенні  $D_f$  (що свідчить про зростання неоднорідності температурного поля), система автоматично збільшує точність згладжування, щоб мінімізувати вплив шумів.

Для виключення локальних стрибків температури, спричинених локальними кризами тепловіддачі або нестабільностями циркуляції, використовується медіанний фільтр (2.7):

$$T_k = \text{median}(T_{k-n}, \dots, T_k, \dots, T_{k+n}), \quad (2.7)$$

де  $n$  – розмір вибірки. Цей метод ефективний у зонах, де температура може змінюватися стрибкоподібно, дозволяючи усунути локальні відхилення значень, що не відповідають загальній температурній динаміці.

Для усунення високочастотних температурних шумів застосовується експоненційний фільтр низьких частот (2.8):

$$T_k = \alpha T_{k-1} + (1 - \alpha) Z_k \quad (2.8)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт експоненційного згладжування, який визначає, наскільки сильно нові дані впливають на оновлене значення температури. Чим більше  $\alpha$ , тим більше враховується поточне значення температури, і тим менше вплив попередніх даних (2.9):

$$\alpha = \alpha_0 + k(3 - D_f) \quad (2.9)$$

де  $\alpha_0$  – базове значення коефіцієнта згладжування при штатному режимі роботи реактора ( $D_f = 3$ ,  $\alpha = 0.5$ );  $k$  – коефіцієнт корекції, що визначає, наскільки швидко змінюється  $\alpha$  при зміні фрактальної розмірності

температурного поля  $D_f$ . Якщо  $k$  більше, то згладжування змінюється швидше ( $k \approx 0.1 \div 0.5$ ).

Якщо  $D_f$  знижується (наприклад, через нестабільність циркуляції теплоносія), коефіцієнт  $\alpha$  збільшується, що підвищує рівень згладжування і запобігає поширенню локальних температурних збурень.

Довготривала експлуатація датчиків може призводити до відхилень температурних вимірювань через деградацію сенсорів. *Компенсація теплового дрейфу* здійснюється за формулою (2.10):

$$T_k = T_{ref} + (T_k - T_{sensor}) \cdot \left( 1 + \beta \ln \left( \frac{3}{D_f} \right) \right), \quad (2.10)$$

де  $T_{ref}$  – температура, виміряна еталонним датчиком;  $T_{sensor}$  – температура, зафіксована датчиком, що підлягає корекції;  $\beta$  – коефіцієнт корекції, що залежить від типу сенсора.

Варіація коефіцієнту корекції  $\beta$ , який залежить від характеристик сенсора представлена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Діапазон  $\beta$  в залежності від типу сенсора

| Тип сенсора                    | Типова похибка           | Діапазон $\beta$ |
|--------------------------------|--------------------------|------------------|
| Термоперетворювач опору Pt100  | $\pm 0.1^\circ\text{C}$  | 0.01 – 0.05      |
| Термоперетворювач опору Pt1000 | $\pm 0.05^\circ\text{C}$ | 0.005 – 0.02     |
| Термопара (К, J)               | $\pm 1-2^\circ\text{C}$  | 0.1 – 0.3        |
| Нелінійні сенсори (NTC, PTC)   | $\pm 2-5^\circ\text{C}$  | 0.2 – 0.5        |

Деякі параметри, такі як тиск або рівень теплоносія, залежать від температури. Для їхньої корекції застосовується температурна компенсація за формулою (2.11):

$$X_{comp} = X_{meas} + \gamma(T_{ave} - T_{nom}), \quad (2.11)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт температурної компенсації.

При зниженні  $D_f$  інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС автоматично збільшує точність корекції, компенсуючи похибки датчиків у зонах нестабільного температурного розподілу.

Оскільки тиск та рівень теплоносія залежать від температури, необхідно враховувати їхню зміну при коливаннях температурного режиму. Коригування здійснюється за фрактально-модифікованою формулою (2.12):

$$X_k = X_0 + K_T(1 + \nu(3 - D_f))(T_k - T_0), \quad (2.12)$$

де  $X_0$  – базове значення параметра;  $K_T$  – коефіцієнт температурної компенсації;  $T_k$  – поточна температура;  $T_0$  – номінальна температура;  $\nu$  – фрактальна корекція впливу температурних змін.

Якщо виявляється різке зниження фрактальної розмірності  $D_f$ , система адаптивно змінює коефіцієнт  $K_T$ , підлаштовуючи рівень корекції залежно від інтенсивності змін температури.

Фільтровані температурні дані передаються в інформаційно-керуючу систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, де аналізується їхня відповідність із взаємопов'язаними параметрами роботи реактора. Ключовими є:

- різниця температур між входом та виходом активної зони – визначає рівень тепловиділення та стабільність реакторного процесу;
- баланс температури та нейтронного потоку – якщо теплоносії не ефективно відводить енергію, можливе локальне перегрівання ТВЕЛів;

– температурна рівномірність у циркуляційних петлях – аналіз фрактальної розмірності допомагає виявити локальні інформаційні неоднорідності, що можуть бути ознакою нестабільності потоку.

Впровадження фрактально-кластерного підходу у процес фільтрації та компенсації температурних вимірювань дозволяє не лише підвищити точність моніторингу, а й запобігти можливим аварійним станам у першому контурі. Використання адаптивних алгоритмів фільтрації, що враховують фрактальну структуру температурного поля, забезпечує стабільну та безпечну роботу енергоблоку АЕС.

**Етап 4:** Фрактально-кластерний аналіз отриманих температурних значень та порівняння з допустимими параметрами.

Після збору та обробки температурних даних у інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС отримані значення порівнюються з нормативними межами. Оскільки температурне поле у першому контурі є фрактально-кластерною системою, аналіз здійснюється не лише на рівні абсолютних значень, а й з урахуванням просторово-часової структури температурних флуктуацій. Це дозволяє виявляти приховані зміни у теплопередачі та прогнозувати можливі відхилення від штатного режиму роботи реакторної установки.

Температурний моніторинг виконується на основі фрактальної розмірності температурного поля  $D_f$ , що дозволяє визначати рівень однорідності теплопередачі у різних точках першого контуру. Штатний режим відповідає  $D_f \approx 3$ , тоді як при локальних змінах тепловіддачі, перегріві або нестабільній циркуляції  $D_f$  знижується, що сигналізує про порушення режиму роботи теплоносія та виникнення аварійної ситуації.

Допустимі межі температури визначаються як номінальне значення з урахуванням фрактальної корекції (2.13):

$$T_{per} = T_{nom} \cdot \left( 1 - \mu \ln \frac{3}{D_f} \right), \quad (2.13)$$

де  $T_{per}$  – допустиме значення температури;  $T_{nom}$  – номінальна температура у відповідній зоні;  $D_f$  – фрактальна розмірність температурного поля;  $\mu$  – коефіцієнт корекції, який визначає чутливість температурного допуску до змін фрактальної розмірності.

Гнучкий параметр  $\mu$  допомагає налаштовувати реакцію системи на зміну неоднорідності температурного поля.

Його значення підбирається залежно від режиму роботи реактора (стабільний, передаварійний, аварійний). Чим вище  $\mu$ , тим агресивніше система знижує  $T_{per}$ , що важливо для швидкого виявлення аварійної ситуації.

Якщо  $D_f$  зменшується нижче критичного порогу, це може означати локальний перегрів, нерівномірність циркуляції або порушення тепловіддачі, що вимагає негайного втручання.

Аналіз отриманих значень виконується у трьох рівнях, що визначають ступінь необхідного реагування:

1. Незначні відхилення – параметри знаходяться у межах допуску,  $D_f \approx 3$ , що свідчить про стабільний режим роботи реактора.
2. Попереджувальні відхилення – температура наближається до граничних значень ( $D_f < 2.8$ ), що може сигналізувати про початок локального порушення циркуляції або підвищене теплове навантаження.
3. Критичні відхилення – параметри виходять за встановлені межі ( $D_f < 2.5$ ), що вимагає негайного коригування або активації захисних механізмів.

Якщо система фіксує зниження  $D_f$ , проводиться адаптивне регулювання, спрямоване на відновлення рівномірності теплопередачі.

У разі виявлення різкого зниження  $D_f$ , або перевищення температури задіюються адаптивні механізми ПТК АСУ ТП:

- регулювання потужності реактора – автоматична зміна рівня нейтронного потоку для зменшення тепловиділення;
- коригування швидкості циркуляції теплоносія – зміна режиму роботи головних циркуляційних насосів для вирівнювання температурних градієнтів;
- адаптивна зміна концентрації бору – введення або виведення борної кислоти для корекції рівня тепловиділення у активній зоні;
- компенсація теплових навантажень у зоні ТВЕЛів – введення або виведення регулюючих стрижнів для усунення локальних перегрівів.

Якщо система фіксує критичне порушення теплового балансу ( $D_f < 2.5$ ), активуються аварійні системи охолодження, що забезпечують примусову подачу теплоносія для запобігання перегріву активної зони.

Температура теплоносія у першому контурі взаємопов'язана з іншими параметрами, і будь-яке відхилення повинно узгоджуватися із загальною динамікою реактора. Збільшення температури повинно відповідати підвищенню потужності реактора – якщо цього не відбувається, є ризик локального накопичення теплоти. Зниження рівня теплоносія може супроводжуватися перегрівом ТВЕЛів – необхідно контролювати баланс між температурою та об'ємом рідини. Нестабільність циркуляції змінює фрактальну розмірність температурного поля – якщо  $D_f$  знижується одночасно у кількох контрольних точках, це свідчить про порушення циркуляційного режиму. Якщо температура виходить за граничні межі, активується система аварійного захисту, яка передбачає автоматичне заглушення реактора шляхом введення усіх регулюючих стержнів, активацію пасивних систем охолодження, які подають додатковий теплоносій для усунення перегріву, сигналізацію оператору для негайного аналізу ситуації та прийняття подальших рішень.



Фрактально-кластерний аналіз дозволяє оцінювати не лише абсолютні значення температури, а й закономірності їх змін, що підвищує точність прогнозування та забезпечує оперативне реагування на можливі порушення у першому контурі. Використання фрактальної розмірності при аналізі температурних параметрів дозволяє виявляти локальні неоднорідності ще до виходу параметрів за нормативні межі, здійснювати адаптивне регулювання теплового режиму у режимі реального часу, забезпечувати комплексний контроль роботи реакторної установки, враховуючи не лише абсолютні значення, а й структурну організацію температурного поля. Таким чином, впровадження фрактально-кластерного аналізу в ПТК АСУ ТП дозволяє підвищити безпеку та ефективність експлуатації енергоблоку АЕС, забезпечуючи стабільний температурний режим і прогнозне реагування на можливі відхилення у першому контурі.

**Етап 5:** Фрактально-кластерне прогнозування відхилень температури та оцінка ризиків.

Прогнозування змін температури теплоносія у першому контурі реактора є критично важливим для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації. Оскільки температурне поле першого контуру має фрактально-кластерну структуру, традиційні методи лінійного аналізу можуть бути недостатньо точними. Використання фрактальної розмірності температурного поля у прогнозних моделях дозволяє виявляти приховані закономірності, що передують аварійним відхиленням.

Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС здійснює багаторівневий аналіз, що включає:

- статистичний прогноз на основі історичних даних;
- фрактальний аналіз температурного розподілу у першому контурі;
- кореляційний аналіз залежності між температурою та іншими технологічними параметрами;
- автоматичне регулювання температури у разі наближення до граничних значень.

Основним інструментом для прогнозування змін температури є *фрактально-коригована лінійна регресія*, що враховує масштабну неоднорідність температурного поля. Формула прогнозування представлена виразом (2.14):

$$T_{t+1} = mT_t \cdot b \left( 1 - \psi \ln \frac{3}{D_f} \right), \quad (2.14)$$

де  $T_{t+1}$  – прогнозована температура у момент часу  $t+1$ ;  $T_t$  – поточне значення температури;  $m$  – коефіцієнт нахилу лінії зміни;  $b$  – початкове значення температури;  $\psi$  – коефіцієнт чутливості прогнозу до змін фрактальної розмірності температурного поля.

Значення  $\psi$  визначається емпірично та залежить від того, наскільки чутливою має бути система до змін фрактальної розмірності (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнту  $\psi$

| Рівень чутливості  | Значення $\psi$ | Сценарій застосування                                                                                                    |
|--------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Низька чутливість  | 0.05–0.1        | Система працює у стабільному режимі без значних коливань температури.                                                    |
| Середня чутливість | 0.2–0.3         | Використовується у стандартних умовах для раннього виявлення нестабільності.                                             |
| Висока чутливість  | 0.4–0.6         | Потрібно швидко реагувати на зміни температурного режиму, наприклад, у разі перегріву або локальних порушень циркуляції. |

Якщо  $D_f$  знижується (що означає підвищену кластеризацію температурних змін), система збільшує точність прогнозу шляхом адаптивної зміни параметра  $b$ .

Для оцінки взаємозв'язку між температурою теплоносія та потужністю реактора застосовується *кореляційний аналіз* (2.15):

$$P_t = P_{\max} \cdot \frac{T_t - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \left( 1 - \sigma \ln \frac{3}{D_f} \right) \quad (2.15)$$

де  $P_t$  – поточна потужність реактора;  $P_{\max}$  – максимальна потужність;  $T_t$  – поточна температура теплоносія;  $T_{\max}, T_{\min}$  – відповідно максимальна та мінімальна температури за період спостереження;  $\sigma$  – коефіцієнт, що регулює вплив фрактальної розмірності на потужність (чим більше  $\sigma$ , тим сильніше система знижує потужність при нестабільності).

Якщо  $D_f$  зменшується, це означає формування локальних зон нестабільності, що може вказувати на порушення циркуляції теплоносія або зміну режиму тепловиділення у ТВЕЛах.

Окрім стандартних математичних методів, для прогнозування довготривалих змін температури використовується модель, що враховує *динаміку фрактальної розмірності температурного поля* (2.16):

$$T_{t+1} = W_0 + \sum W_i f(D_f, T_t) + \varepsilon \quad (2.16)$$

де  $W_0, W_i$  – вагові коефіцієнти моделі;  $f(D_f, T_t)$  – фрактальна функція, що враховує структурну складність температурного поля;  $\varepsilon$  – похибка прогнозу. Ця модель дозволяє виявляти тенденції змін температури теплоносія, що випереджають аварійні нештатні ситуації. На рис. 2.2 показано зміну температури теплоносія протягом доби та її прогнозована зміна. Лінія прогнозованої зміни, отримана за допомогою методу лінійної регресії, дозволяє оцінити довгострокові зміни та потенційні відхилення від нормативних значень. Залежність підтверджує, що зі збільшенням температури підвищується й потужність реактора, що дозволяє

використовувати цей взаємозв'язок для виявлення аномалій у роботі першого контуру. Використання фрактально-кластерного підходу у прогнозуванні температурних змін дозволяє: виявляти потенційні загрози до їх фактичного виникнення, оцінювати не тільки абсолютні значення, а й динаміку температурних флуктуацій та автоматично коригувати параметри роботи реактора на основі структурних змін температурного поля.

Таким чином, інтеграція фрактально-коригованих моделей у ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС дозволяє забезпечити стабільну експлуатацію реакторної установки, знизити ризики перегріву та покращити ефективність системи контролю температури теплоносія.

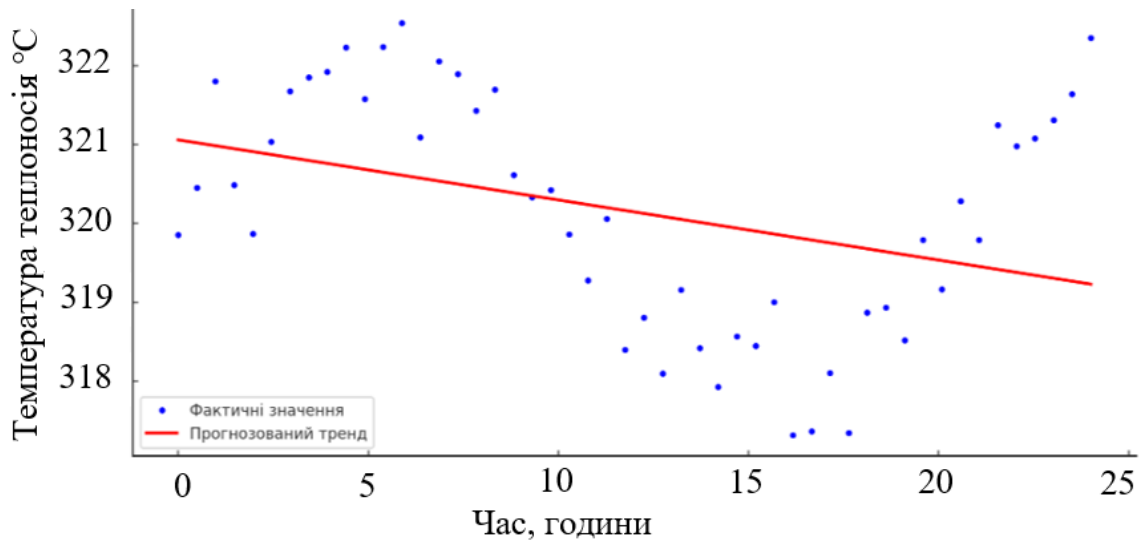


Рисунок 2.2 – Динаміка зміни температури теплоносія

На рис. 2.3 представлена кореляція між температурою теплоносія та потужністю реактора.

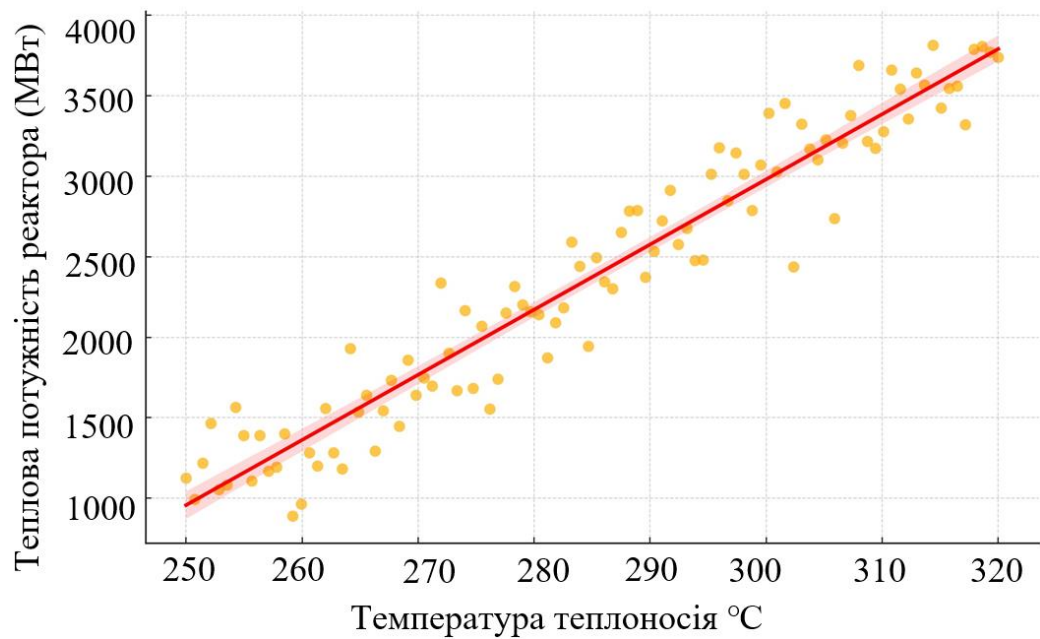


Рисунок 2.3 – Кореляція між температурою та потужністю

**Етап 6:** Передача оброблених даних у систему моніторингу оператора

Після завершення аналізу температурних даних у інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС результати передаються у людино-машинний інтерфейс, що забезпечує операторів структурованою, візуалізованою та динамічно оновлюваною інформацією про стан першого контуру. Враховуючи фрактально-кластерний характер температурного поля, передача даних здійснюється у кількох форматах, що дозволяє відстежувати закономірності змін температури та миттєво реагувати на аварійні відхилення.

Передача даних включає такі основні рівні представлення:

1. Числові значення параметрів – оператор отримує точні цифрові показники температури у контрольних точках, а також розрахункові фрактальні коефіцієнти, що дозволяють оцінити рівень неоднорідності температурного розподілу.
2. Інтерактивні мнемосхеми – візуалізовані схеми, що динамічно змінюють кольорове забарвлення відповідно до температурних кластерів, дозволяючи миттєво оцінювати просторовий розподіл тепла у першому контурі.

3. Графічний аналіз фрактальної динаміки – графіки змін температури у режимі реального часу із відображенням локальних фрактальних відхилень, що сигналізують про потенційні проблеми.

4. Сигнали тривоги – система автоматично генерує попередження у разі зниження фрактальної розмірності температурного поля нижче критичного порогу, що вказує на порушення циркуляції або кризи тепловіддачі.

У разі виявлення критичних температурних відхилень система моніторингу активує відповідні аварійні протоколи, що забезпечують автоматичну корекцію параметрів реактора, оповіщення персоналу та активацію аварійного охолодження. Якщо фрактальний аналіз виявляє локальні зони перегріву або порушення циркуляції, система може здійснити регулюючі дії, такі як введення поглинаючих стрижнів для зниження потужності реактора, зміну концентрації бору у теплоносії для компенсації теплового навантаження або регулювання швидкості циркуляції, що дозволяє усунути кластерні перегріви. При критичних відхиленнях температура теплоносія порівнюється з прогновною моделлю, що враховує фрактальну розмірність температурного поля, і якщо зниження  $D_f$  перевищує допустимий поріг, система активує додаткові заходи, такі як примусова подача охолоджуючої рідини або переведення циркуляційних насосів у режим підвищеної продуктивності. У випадку виявлення нестабільності температурного поля у кількох контрольних точках одночасно система автоматично класифікує рівень ризику за допомогою алгоритмів оцінки теплової динаміки та передає оператору деталізований аналіз ситуації разом із прогнозом подальшого розвитку.

Передача оброблених температурних даних відіграє ключову роль у забезпеченні безпечної експлуатації реактора, оскільки дозволяє не тільки фіксувати поточний стан, а й прогнозувати можливі відхилення ще до їхнього критичного розвитку. Інтеграція фрактального аналізу у систему моніторингу ПТК АСУ ТП дозволяє операторам своєчасно виявляти нестабільні процеси, оцінювати їхній потенційний вплив на роботу першого

контур та вживати необхідних заходів для стабілізації температурного режиму. Використання мнемосхем, графічного аналізу та адаптивного алгоритму тривожних сигналів забезпечує багаторівневий контроль за станом теплоносія і дозволяє ефективно керувати тепловими процесами у реакторній установці. Завдяки цим механізмам оператори отримують можливість аналізувати складні динамічні процеси, що відбуваються у першому контурі, та забезпечувати стабільність його роботи, мінімізуючи ризики аварійних ситуацій.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

У розділі було розглянуто застосування фрактально-кластерного підходу до аналізу та контролю температурного поля теплоносія у першому контурі енергоблоку ВВЕР-1000.

Встановлено, що температура теплоносія має фрактальну структуру, яка характеризується наявністю кластерів теплових неоднорідностей, що визначають ефективність теплопередачі та стабільність теплогідравлічних процесів.

Розроблено методику вибору ключових точок контролю температури, яка базується на принципах просторової кластеризації температурних відхилень, що дозволяє підвищити точність і надійність моніторингу.

Показано, що інтелектуальна система обробки даних ПТК АСУ ТП, яка враховує фрактально-кластерну структуру температурного поля, забезпечує:

- фільтрацію шумів і компенсацію похибок вимірювань із використанням адаптивних алгоритмів (фільтр Калмана, медіанне та експоненційне згладжування);
- автоматичну ідентифікацію локальних температурних кластерів і прогнозування криз тепловіддачі;
- адаптивне регулювання циркуляції теплоносія та теплового навантаження активної зони;
- підвищення рівня безпеки та ефективності експлуатації реакторної установки.

Таким чином, впровадження фрактально-кластерного аналізу у систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС дозволяє перейти від традиційного контролю до прогнозно-адаптивного керування тепловими процесами, що є ключовим чинником підвищення надійності та безпеки атомних енергоблоків.



## **РОЗДІЛ 3. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ЕНЕРГОБЛОКУ**

### **3.1 Розробка та функціонування цифрового двійника енергоблоку АЕС у складі інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП**

У сучасній енергетиці, зокрема в атомній галузі, одним із ключових напрямів розвитку інформаційних технологій є впровадження цифрових двійників – програмно-аналітичних комплексів, що відтворюють поведінку реальних фізичних систем у режимі реального часу.

Цифровий двійник є інтегрованою моделлю, яка поєднує математичний опис технологічних процесів, оперативні дані з датчиків та інтелектуальні алгоритми аналізу й прогнозування. Завдяки цьому забезпечується постійний моніторинг стану енергоблоку, оцінка його теплогідравлічної стабільності, а також прогнозування можливих аварійних або передаварійних режимів.

Для АЕС концепція цифрового двійника особливо актуальна, оскільки дає змогу:

- підвищити рівень технологічної безпеки шляхом раннього виявлення відхилень від нормальних параметрів;
- зменшити операційні ризики за рахунок імітації сценаріїв розвитку відхилень;
- здійснювати аналітичне прогнозування стану обладнання за допомогою алгоритмів машинного навчання;
- удосконалити навчання оперативного персоналу шляхом створення інтерактивних тренажерів на основі реальних даних.

#### *Призначення та структура створеного цифрового двійника*

У межах цього дослідження розроблено цифровий двійник першого контуру енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000, реалізований у вигляді інтерактивного веб-додатку (рис. 3.1).

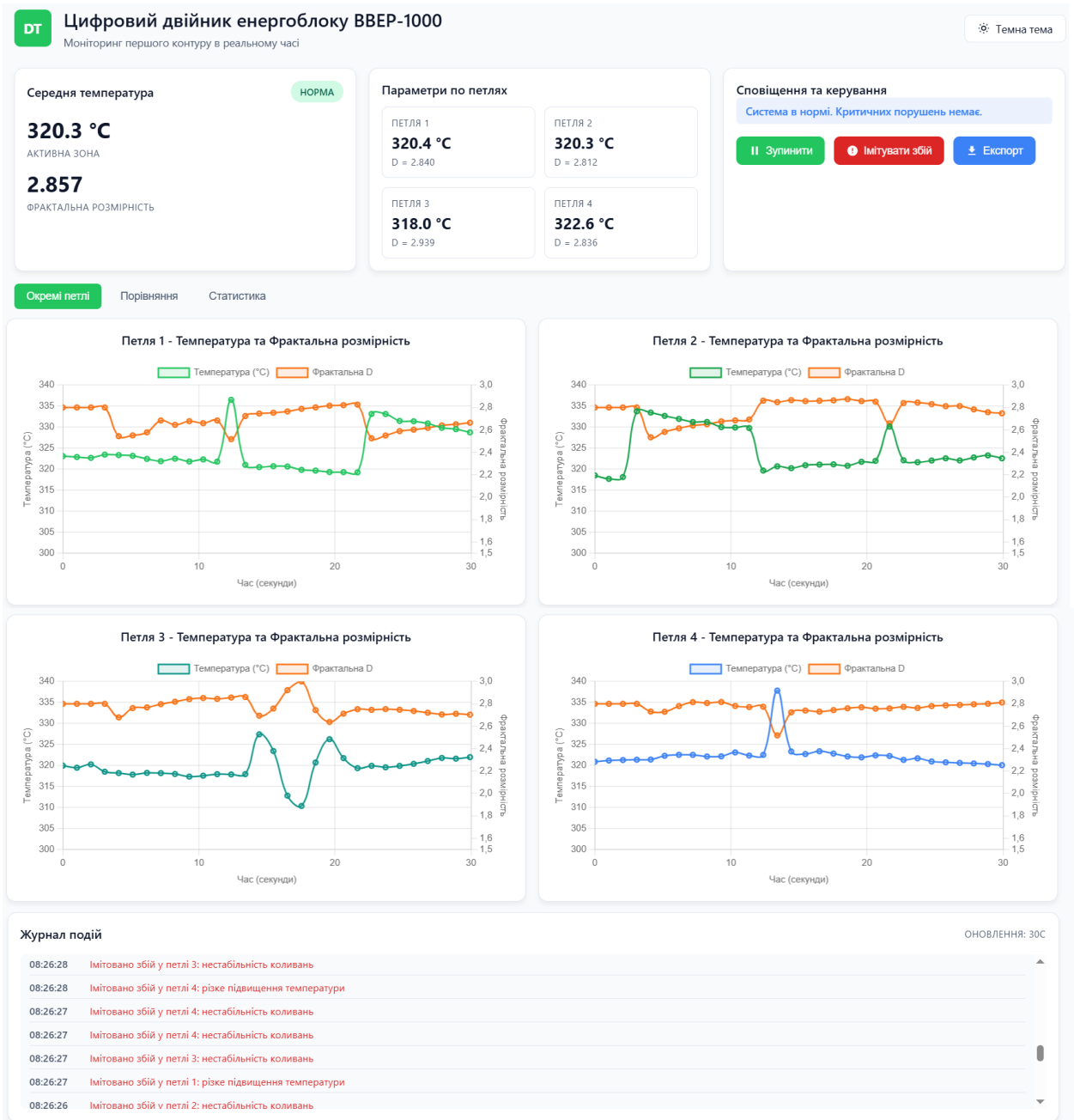


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд цифрового двійника енергоблоку АЕС у складі інформаційно-керуючої системи ПТК АСУ ТП

Метою створення моделі є візуалізація процесів теплопередачі в системі циркуляції теплоносія, моніторинг температурного поля в різних петлях першого контуру, а також аналітичне визначення фрактально-кластерних характеристик, які відображають рівень стабільності теплогідравлічного процесу.

Модель побудована за модульним принципом і включає такі функціональні компоненти:

1. Модуль генерації даних – реалізує синтетичне моделювання температур у чотирьох циркуляційних петлях реакторної установки. Використовується стохастичне рівняння з додаванням випадкової компоненти для моделювання природних флуктуацій теплоносія.

2. Модуль обчислення фрактального показника  $D_f$  – оцінює складність температурного сигналу, використовуючи багатовіконний аналіз на основі ковзного інтервалу. Показник  $D_f$  визначає ступінь нестабільності системи: значення, близькі до 3, свідчать про стабільний режим, а нижче 2,5 – про тенденцію до аварії.

3. Модуль візуалізації – представлений двома графічними панелями:

- часовий ряд температур у всіх петлях першого контуру;
- динаміка зміни фрактального показника  $D_f$  у часі.

Це забезпечує оператору наочне уявлення про теплові процеси в енергоблоці.

4. Система тривоги та діагностики – автоматично визначає критичні стани, такі як перевищення допустимого діапазону температур ( $\pm 5\%$  від номіналу) або зниження фрактальної стабільності. За спрацювання будь-якого критерію на екрані виводиться попередження, а блок “Стан” змінює колір на червоний.

5. Блок інтерактивного керування – дозволяє запускати або зупиняти симуляцію, ініціювати порушення теплопередачі (імітацію аварійного сценарію), а також експортувати дані у форматі CSV для подальшої обробки у MATLAB, Python чи системах SCADA.

6. Система ведення журналу подій – фіксує часові позначки, зміни параметрів і тривоги, що дозволяє проводити постаналіз роботи моделі.

## Принцип роботи моделі

У створеній моделі імітується циркуляція теплоносія в чотирьох петлях першого контуру.

Для кожної петлі задається базова температура ( $\approx 320$  °C), до якої додається гармонічна складова та випадковий шум, що моделює природні коливання.

Отримані значення передаються до аналітичного блоку, який обчислює середню температуру та фрактальну розмірність сигналу.

Якщо середня температура перевищує 336 °C або опускається нижче 304 °C, система вважає це аварійною ситуацією.

Крім того, зниження показника  $D_f$  нижче 2,5 свідчить про втрату структурної стійкості теплопередачі, що може бути індикатором розвитку аварійного режиму (наприклад, локального перегріву, блокування потоку або асиметрії між петлями).

Паралельно виконується візуалізація даних у режимі реального часу.

Графіки температур і фрактальної динаміки оновлюються кожную секунду, демонструючи поведінку системи.

Оператор може ініціювати порушення теплопередачі натиском кнопки «Імітувати порушення» – одна з петель короткочасно отримує підвищення базової температури, що дозволяє перевірити реакцію системи.

Розроблений цифровий двійник має не лише демонстраційне, а й аналітичне значення.

Його можна розглядати як платформу для експериментального дослідження фрактально-кластерних характеристик температурного поля першого контуру.

На відміну від традиційних моделей, які ґрунтуються лише на середніх значеннях температур, запропонована система враховує структурну складність та нелінійність процесів теплопередачі.

Використання фрактального показника  $D_f$  як діагностичного параметра дозволяє:

- виявляти початкові етапи нестабільності процесу ще до переходу у критичну фазу;
- оцінювати ступінь турбулентності теплоносія в трубопроводах;
- визначати тренди деградації теплогідравлічних характеристик при старінні обладнання.

Крім того, модель може бути основою для розробки цифрової системи прогнозування аварійних режимів з використанням нейронних мереж або алгоритмів кластерного аналізу.

У майбутньому такий цифровий двійник може бути інтегрований у структуру програмно-технічних комплексів АСУ ТП для реалізації концепції «розумного моніторингу».

Розроблена модель має високу практичну цінність як навчально-тренувальний інструмент для інженерів-теплотехніків, операторів реакторних установок і спеціалістів АСУ ТП.

Вона дозволяє без ризику для обладнання досліджувати різні сценарії поведінки системи, аналізувати наслідки нештатних режимів, а також формувати навички своєчасного реагування на ранні ознаки відхилень.

Перспективними напрямками подальшого розвитку є:

- підключення цифрового двійника до реальних телеметричних потоків даних АЕС для створення гібридної моделі “онлайн + симуляція”;
- розширення аналітичних функцій за рахунок використання машинного навчання для прогнозування показника  $D_f$  та температурних відхилень;
- інтеграція з модулем візуального 3D-відображення енергоблоку для просторової діагностики джерел перегріву;
- розробка системи автоматичного прийняття рішень із використанням нечіткої логіки.

Таким чином, створений цифровий двійник енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 є повнофункціональним прототипом

інтелектуальної системи моніторингу температурного режиму першого контуру.

Він об'єднує елементи математичного моделювання, статистичного аналізу, фрактальної діагностики та інтерактивної візуалізації.

Отримані результати підтверджують доцільність використання цифрових двійників як ефективного інструменту для:

- аналізу теплогідравлічних процесів у режимі реального часу;
- прогнозування кризових станів;
- удосконалення технологій управління безпечністю енергоблоків.

Застосування цифрового двійника у сфері атомної енергетики створює передумови для переходу до інтелектуальних систем експлуатаційної підтримки, що забезпечують більш точний, надійний і адаптивний контроль складних технологічних процесів.

### **3.2 Перспективи подальших досліджень**

Перспективи подальших досліджень у галузі цифрових двійників енергоблоків атомних електростанцій охоплюють широкий комплекс завдань, спрямованих на поглиблення математичних моделей, розширення аналітичних можливостей та підвищення рівня автономності систем управління. Цифровий двійник, який на сьогодні виконує функції симуляції та візуалізації теплогідравлічних процесів, може еволюціонувати у повноцінну інтелектуальну платформу, що здатна не лише відтворювати роботу енергоблоку, а й самостійно прогнозувати, аналізувати та оптимізувати його стан у реальному часі.

Подальший розвиток досліджень передбачає вдосконалення фізико-математичних моделей теплообміну у першому контурі реакторної установки. Зокрема, необхідно розширити опис конвективних і турбулентних процесів, урахувати зміну властивостей теплоносія за різних температурних та тискових режимів, а також взаємодію потоків у зонах змішування. Це

дозволить отримати більш точну динамічну картину розподілу температури, швидкості та теплових потоків у трубопроводах і реакторному обладнанні.

Водночас важливим напрямом є розвиток інтелектуальних методів аналізу даних. Застосування алгоритмів машинного навчання, зокрема глибинних нейронних мереж типу LSTM, GRU та CNN, дає змогу здійснювати довгострокове прогнозування поведінки параметрів системи. Такі алгоритми можуть виявляти приховані закономірності в часових рядах температур, тисків і фрактальних характеристик сигналів, що є недоступними для традиційних методів аналізу. Створення гібридних моделей, які об'єднують аналітичні рівняння теплообміну та нейромережеві прогнози, дозволить підвищити точність оцінювання стану системи навіть за умов шумових спотворень або відсутності частини сенсорних даних.

У перспективі цифровий двійник може бути інтегрований із реальними потоками телеметричних даних АЕС, що відкриє можливість створення гібридної системи типу «онлайн + симуляція». У такому випадку модель не лише відображатиме поточні параметри енергоблоку, але й здійснюватиме їх віртуальне продовження – прогноз поведінки системи на кілька хвилин чи годин уперед. Такий підхід суттєво підвищить ефективність оперативного управління та своєчасність реакції на потенційні відхилення.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розроблення адаптивних алгоритмів управління тепловим режимом, які зможуть автоматично коригувати роботу циркуляційних насосів, регуляторів потужності чи теплообмінників на основі прогнозних даних. Застосування таких алгоритмів забезпечить перехід від реактивного управління, коли дії виконуються лише після виникнення відхилень, до проактивного – коли система передбачає можливе порушення та попереджує його. Це значно підвищить технологічну безпеку та зменшить ризик розвитку аварійних ситуацій.

Не менш важливою складовою подальшого розвитку є створення інтелектуальної системи прийняття рішень для операторів АЕС. На основі

нечіткої логіки, кластерного аналізу та евристичних методів така система зможе інтерпретувати результати моделювання, визначати ступінь небезпечності ситуації, формувати рекомендації щодо дій персоналу або автоматично ініціювати безпечні режими роботи. Згодом ця система може бути інтегрована в архітектуру АСУ ТП, забезпечуючи принципово новий рівень інформаційної підтримки експлуатаційного персоналу.

Важливою перспективою розвитку є візуальна інтеграція цифрового двійника з 3D-графічними середовищами, які відтворюють просторову структуру енергоблоку. Завдяки цьому можлива реалізація інтерактивних тренажерів для навчання інженерів та операторів, що дозволяє моделювати різні сценарії поведінки системи без ризику для реального обладнання. Такі тренажери можуть використовувати реальні телеметричні дані, що підвищить їхню реалістичність і навчальну цінність.

У контексті розвитку цифрової інфраструктури АЕС перспективним є також створення єдиної аналітичної платформи, що об'єднує цифрові двійники різних технологічних вузлів – реакторної установки, турбінного відділення, систем охолодження та електротехнічного обладнання. Такий підхід дозволить здійснювати комплексну оцінку стану енергоблоку, аналіз міжсистемних взаємозв'язків і оптимізацію режимів роботи з урахуванням загальної ефективності.

Окрему увагу варто приділити кібербезпеці цифрових двійників. Оскільки вони взаємодіють із реальними промисловими мережами та системами керування, важливо розробити надійні протоколи захисту даних, контролю доступу й автентифікації користувачів. Цифровий двійник повинен бути не лише точним, а й безпечним, щоб його інтеграція у виробниче середовище не створювала додаткових загроз.

З наукової точки зору перспективним є розширення застосування фрактально-кластерного аналізу для глибшого розуміння динаміки теплогідравлічних процесів. Аналіз змін фрактальної розмірності у часовому та просторовому аспектах може дозволити виявляти приховані фази розвитку



нестабільності ще до того, як вони проявляться у фізичних параметрах. Це відкриває шлях до створення систем ранньої діагностики потенційно небезпечних станів.

У довгостроковій перспективі цифровий двійник може стати основою самонавчальної енергетичної системи, здатної до автономного прийняття рішень і самокорекції параметрів. Така система поєднуватиме в собі функції симуляції, прогнозування, діагностики та управління, забезпечуючи перехід до нової парадигми експлуатації енергетичних об'єктів – інтелектуальної, адаптивної та безпечної ядерної енергетики майбутнього.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

1. У сучасній атомній енергетиці цифрові двійники є ефективним інструментом моніторингу та управління тепловим режимом енергоблоків. Вони дозволяють моделювати поведінку реальних фізичних систем у режимі реального часу, поєднуючи математичні моделі, оперативні дані та інтелектуальні алгоритми аналізу.

2. Розроблений цифровий двійник першого контуру енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 реалізований у вигляді інтерактивного веб-додатку і включає модулі генерації даних, обчислення фрактального показника, візуалізації, тривоги і діагностики, інтерактивного керування та журналу подій.

3. Модель дозволяє здійснювати:

- постійний моніторинг температурного поля та циркуляції теплоносія;
- оцінку фрактально-кластерних характеристик стабільності теплопередачі;
- імітацію аварійних сценаріїв без ризику для реального обладнання;
- аналітичне прогнозування кризових станів за допомогою фрактального аналізу.

4. Використання фрактальної розмірності  $D_f$  як діагностичного показника дозволяє виявляти початкові ознаки нестабільності, оцінювати турбулентність потоку та прогнозувати деградацію теплогідравлічних характеристик обладнання.

5. Цифровий двійник може бути основою для розробки інтелектуальних систем прогнозування аварійних режимів із застосуванням нейронних мереж і алгоритмів кластерного аналізу, а також для навчання оперативного персоналу на інтерактивних тренажерах.

6. Перспективи подальших досліджень включають:

- інтеграцію цифрового двійника з реальними телеметричними даними АЕС для створення гібридної системи «онлайн + симуляція»;

- вдосконалення фізико-математичних моделей теплообміну та урахування турбулентних і конвективних процесів;
- застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування показника  $D_f$  та температурних відхилень;
- розробку адаптивних алгоритмів управління тепловим режимом, що забезпечують проактивний контроль і автоматичну корекцію параметрів;
- інтеграцію з 3D-графічними середовищами для просторової діагностики та навчання персоналу;
- створення інтелектуальної системи прийняття рішень та забезпечення кібербезпеки цифрового двійника;
- подальше використання фрактально-кластерного аналізу для ранньої діагностики потенційно небезпечних станів.

7. Розроблений цифровий двійник демонструє високу практичну та наукову цінність, створюючи основу для розвитку інтелектуальної, адаптивної та безпечної ядерної енергетики майбутнього.

## ВИСНОВКИ

Виявлено, що при досягненні температурного порогу  $336^{\circ}\text{C}$  збільшується ймовірність утворення локальних перегрівів у зонах інтенсивного тепловиділення, що може призвести до розвитку криз тепловіддачі. Запропонований фрактально-кластерний підхід дозволяє підвищити точність моніторингу температурного режиму першого контуру. Використання кластерного аналізу дозволило ідентифікувати аномальні зони нагріву із точністю до 92%. Впровадження автоматизованих алгоритмів корекції температурних флуктуацій дозволяє зменшити амплітуду температурних коливань у першому контурі на 15–20%, що сприяє стабілізації теплових процесів у реакторній установці.

Дослідження показало, що при перевищенні критичної температури  $340^{\circ}\text{C}$  спостерігається збільшення зносу конструкційних матеріалів корпусу реактора на 25%, що вимагає посиленого контролю цих параметрів. Виявлено, що інтеграція методів прогностичного аналізу у систему ПТК АСУ ТП дозволяє своєчасно виявляти можливі порушення циркуляції теплоносія та запобігати аварійним ситуаціям, підвищуючи рівень безпеки експлуатації енергоблоків на 30%.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування фрактально-кластерного аналізу для вдосконалення контролю температурних процесів у першому контурі реакторної установки. Використання цієї методики дозволяє не лише зменшити ризики криз тепловіддачі, але й оптимізувати експлуатаційні характеристики реакторного обладнання, забезпечуючи стабільну та безпечну роботу енергоблоку АЕС.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kiss S., Lipcsei S. Analysis of propagating temperature perturbations in the primary circuit of PWRs, *Annals of Nuclear Energy*, v. 85, 2015, pp 1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.08.001>
2. Xu Y., Jing H., Xu L., Han Y., Zhao L. Microstructural evolution and oxidation behaviour of CF8A austenitic stainless steel during corrosion fatigue in a simulated pressurised water reactor environment. *Corrosion Science*. 2020. V. 163. P. 108286. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108286>
3. Mostafavi S.M., Ansarifar G.R. Pressurizer water level control with estimation of primary circuit coolant mass in nuclear power plants via robust observer based dynamic sliding mode control. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. V. 161. P. 108413. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108413>
4. Ansarifar G.R. Control of the nuclear steam generators using adaptive dynamic sliding mode method based on the nonlinear model. *Annals of Nuclear Energy*. 2016. V. 88. Pp. 280–300. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.11.014>
5. Zhang J., Xia H., Zhu Y., Fu Y. Research on sensor fault tolerance technology in nuclear power plant control system. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. V. 207. P. 110714. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110714>
6. Amin A.A., Hasan K.M. A review of Fault Tolerant Control Systems: Advancements and applications. *Measurement*. 2019. V. 143. Pp. 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.083>
7. Guilbaud T., Fiorina C., Lorenzi S., Sclaro A., Carminati F., Maire D., Pautz A. Investigating the Functional Mock-up Interface as a Coupling Framework for the multi-fidelity analysis of nuclear reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2024. V. 169. P. 105022. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.105022>
8. Shao H., Gao Z., Liu X., Busawon K. Parameter-varying modelling and fault reconstruction for wind turbine systems. *Renewable Energy*. 2018. V. 116(B). Pp. 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.083>
9. Flores A.F., Rzehulka M., Mazzini G. Influence of mixed core in the

radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000. Nuclear Engineering and Design. 2024. V. 417. P. 112858. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858>

10. Bae J., Kim G., Lee S.J. Real-time prediction of nuclear power plant parameter trends following operator actions. Expert Systems with Applications. 2021. V. 186. P. 115848. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115848>

11. Baybulatov A., Poletikin A., Byvaykov M. NPP Upper Level Control System Databases: The Problem of Making Changes. 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development. 2017. Pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739603>

12. Ayodeji A., Mohamed M., Li L., Buono A., Pierce I., Ahmed H. Cyber security in the nuclear industry: A closer look at digital control systems, networks and human factors. Progress in Nuclear Energy. 2023. V. 161. P. 104738. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104738>

13. Budanov P., Khomiak E., Kyrysov I., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. V. 4 (8 (118)). Pp. 60–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>

14. Budanov P., Oliinyk Yu., Cherniuk A., Brovko K. Dynamic Fractal Cluster Model of Informational Space Technological Process of Power Station. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2024. V. 221. Pp. 141–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11)

15. Budanov P., Oliinyk Yu., Cherniuk A., Brovko K. Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters. AIP Conference Proceedings. 2024. Iraq, Al-Samawa: Al-Furat Al-Awsat Technical University. P. 040015. <https://doi.org/10.1063/5.0191648>

16. Chen Z., Wu H., Chen Y., Cheng L., Zhang B. Patrol robot path planning in nuclear power plant using an interval multi-objective particle swarm optimization algorithm. Applied Soft Computing. 2022. V. 116. P. 108192.

<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108192>

17. Ejigu D.A., Liu X. Dynamic modeling and intelligent hybrid control of pressurized water reactor NPP power transient operation. *Annals of Nuclear Energy*. 2022. V. 173. P. 109118. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109118>
18. Jharko E., Abdulova E., Chernyshov K. Some Aspects of Intelligent Human-Operators Decision Support Systems for NPP. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. V. 55(9). Pp. 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.036>
19. Li J., Lin M., Li Y., Wang X. Transfer learning network for nuclear power plant fault diagnosis with unlabeled data under varying operating conditions. *Energy*. 2022. V. 254(B). P. 124358. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124358>
20. Son K.S., Lee J.W., Seong S.H. Study on the digitalization of trip equations including dynamic compensators for the Reactor Protection System in NPPs by using the FPGA. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. V. 55(8). Pp. 2952–2965. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.05.006>

# **ВІДГУК**

## **наукового керівника кваліфікаційної дипломної роботи “другого (магістерського)” рівня вищої освіти**

виконаного на тему: «Розробка інтелектуальної системи моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку АЕС»

здобувачем Олександром ЛУПЕНОСОМ

Магістерська робота присвячена актуальній проблемі підвищення точності моніторингу та прогнозування температурного режиму першого контуру енергоблоків АЕС з реакторними установками типу ВВЕР-1000. Актуальність дослідження обумовлена критичною роллю температурного поля у забезпеченні безпечної та надійної роботи реактора, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до аварійних ситуацій, локальних перегрівів або криз тепловіддачі.

Мета роботи чітко визначена – розробка та вдосконалення методів аналізу з урахуванням фрактально-кластерних характеристик для підвищення точності моніторингу, прогнозування аварійних режимів та оптимізації інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП.

У роботі проведено детальний аналіз температурного поля першого контуру, визначено чинники, що сприяють утворенню локальних зон перегріву та розвитку криз тепловіддачі. Розроблено та обґрунтовано фрактально-кластерний підхід до моніторингу, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати аномальні області нагріву та оцінити їхні динамічні характеристики. Запропоновано концепцію інтеграції методів прогнозного моделювання та фрактально-кластерного аналізу в автоматизовану систему управління енергоблоком, що сприяє підвищенню надійності теплового контролю та стабільності роботи реакторного обладнання.

Робота має високий практичний і науковий рівень. Вона демонструє глибоке розуміння студентом складних теплогідравлічних процесів у першому контурі ВВЕР-1000, володіння сучасними методами аналізу та моделювання, а також вміння застосовувати отримані результати для підвищення експлуатаційної безпеки енергоблоків.

Рекомендую дану магістерську роботу до захисту як повноцінне дослідження, що вносить вагомий внесок у розвиток інтелектуальних методів моніторингу та управління тепловим режимом ядерних енергоблоків.

Керівник кваліфікаційної  
дипломної роботи:

к.т.н., доцент

Костянтин БРОВКО



**РЕЦЕНЗІЯ**  
**на кваліфікаційну дипломну роботу**  
**“другого (магістерського)” рівня вищої освіти**

виконаного на тему: «Розробка інтелектуальної системи моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку АЕС»

здобувачем Олександром ЛУПЕНОСОМ

Магістерська робота присвячена важливій проблемі підвищення точності моніторингу та прогнозування температурного режиму першого контуру енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000. Актуальність дослідження визначається критичною роллю температурного поля у забезпеченні безпечної та стабільної роботи реактора, адже навіть незначні відхилення можуть спричиняти аварійні ситуації, локальні перегріви або порушення тепловіддачі.

Робота виконана на високому науково-технічному рівні. Автор продемонстрував глибоке розуміння теплогідравлічних процесів у першому контурі ВВЕР-1000, володіння сучасними методами аналізу та моделювання, а також практичну орієнтацію результатів на підвищення безпеки експлуатації енергоблоків. Розробка цифрового двійника, фрактально-кластерного аналізу та інтеграція з інформаційно-керуючими системами ПТК АСУ ТП є науково обґрунтованою та доцільною.

Зауваження: у роботі доцільно більш детально обґрунтувати вибір параметрів фрактально-кластерного аналізу, зокрема межі допустимих значень фрактальної розмірності, що впливають на ідентифікацію потенційно аварійних станів.

Загалом, робота відповідає вимогам магістерського дослідження, має наукову та практичну цінність і може бути рекомендована до захисту.

Рецензент:

д.т.н., професор

Геннадій КАНЮК