

УДК (UDC) 621.311.25:519.816

**Бровко Костянтин
Юрійович***к.т.н., доцент**Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна майдан
Свободи, 4м. Харків, 61022, Україна**e-mail: brovkokonstantin@gmail.com**<https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>***Буданов Павло
Феофанович***к.т.н., доцент**Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна майдан
Свободи, 4м. Харків, 61022, Україна**e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net**<https://orcid.org/0009-0000-4519-3879>***Винокурова Наталія
Дмитрівна***асистент**Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна майдан
Свободи, 4м. Харків, 61022, Україна**e-mail: v.natasha.d@gmail.com**<https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>*

Інтелектуальна система моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку атомної електростанції на основі фрактально-кластерного аналізу

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 прогнозного 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*

Як цитувати: Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д. Інтелектуальна система моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку атомної електростанції на основі фрактально-кластерного аналізу. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління.* 2025, вип. 65. С.14-32. [ht tps://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02](https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02)

How to quote: K. Brovko, P. Budanov and N. Vynokurova, "Intelligent system for monitoring the temperature regime of the primary circuit of a nuclear power plant power unit based on fractal-cluster

analysis”, *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 14-32, 2025. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02> [in Ukrainian]

Вступ

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.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. 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.

Мета дослідження. 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 енергоблоків 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.

Матеріали дослідження. 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. 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°C або її зниженні нижче 304°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 теплоносієм 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 1. Номінальні та граничні значення температури теплоносія

Table 1. Nominal and limit values of coolant temperature

Параметр	Значення, °C
Номінальна температура на виході з активної зони	320°C
Допустиме відхилення від номіналу	±5% (304–336°C)
Температура на вході у реактор	≈ 290–295°C
Гранична температура для безпечної експлуатації	340°C
Температура початку криз тепловіддачі	600–800°C (локально у ТВЕЛах)
Критична температура аварійного стану	>1200°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°C ±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°C, це може свідчити про недостатнє охолодження у парогенераторах, що призводить до зменшення температурного градієнта та погіршення циркуляції теплоносія. Якщо температура падає нижче 285°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°C, це може сигналізувати про зменшення ефективності циркуляції через формування стоячих температурних хвиль або локальних зон застою. Якщо ж температура падає нижче 285°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°C , починається криза тепловіддачі, що означає формування критичних теплових кластерів, здатних спричинити локальні аварійні ситуації. Якщо температура досягає 1200°C , можлива деградація 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.

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 (1):

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

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

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

$$U = S(T_1 - T_2), \quad (2)$$

де: U – термо-ЕРС (мВ); S – коефіцієнт термоелектричної чутливості (для типу К $\sim 41 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$), 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°C до $+1300^\circ\text{C}$ для контролю температури у першому контурі, та типу В (Платина-Родій) із діапазоном від 600°C до 1800°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.

Термопарі 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 перегріву 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.

Таблиця 2. Порівняння ТПО та термопар

Table 2. Comparison of resistance temperature transducers and thermocouples

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°C	До 1800°C
Час реакції	Відносно повільний	Швидкий
Стійкість до радіації	Середня	Висока
Використання	Трубопроводи, контурні системи	Внутрішньоактивні вимірювання, високотемпературні зони

Аналіз даних із табл. 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 термопари, 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.

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.

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. 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.

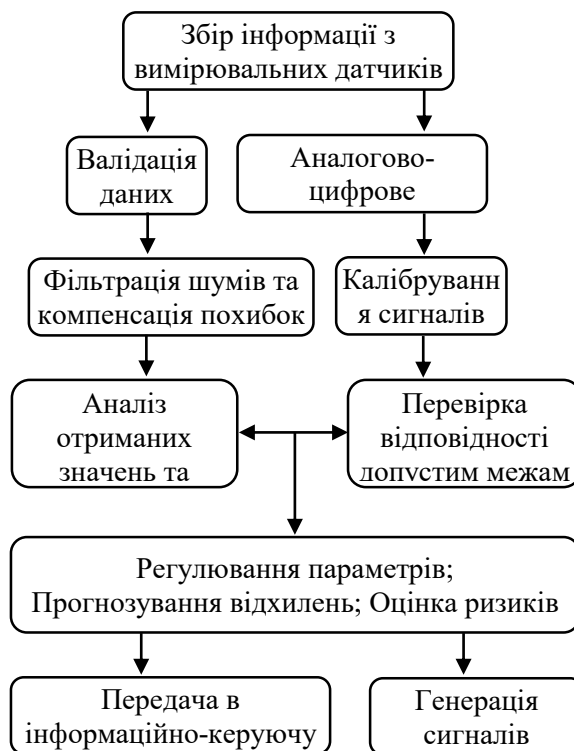


Рис. 1. Блок-схема алгоритму обробки інформації в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС

Fig. 1. Block diagram of the information processing algorithm in the information and control system of the NPP power unit's

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 теплогідралічних 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 (3):

$$V_{dig} = \frac{V_{an} \cdot 2^N}{V_{ref}}, \quad (3)$$

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:

$$V_{digC} = V_{dig} \cdot f(D_f, \xi), \quad (4)$$

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; ξ – емпіричний коефіцієнт, що визначає ступінь впливу неоднорідності на точність вимірювань. Типові значення ξ 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 мікрвольт 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 (5):

$$T_k = T_{k-1} + K_k (Z_{meas} - T_{k-1}), \quad (5)$$

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

Коефіцієнт Калмана коригується з урахуванням фрактальної неоднорідності температурного поля обчислюється за формулою (6):

$$K_k = \frac{P_{k-1}}{P_{k-1} + R} \cdot (1 + \lambda(3 - D_f)), \quad (6)$$

P_{k-1} – дисперсія прогнозу; R – дисперсія шуму вимірюваного параметра; D_f – фрактальна розмірність температурного розподілу; λ – 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 виміряного 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 (7):

$$T_k = \text{median}(T_{k-n}, \dots, T_k, \dots, T_{k+n}), \quad (7)$$

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* (8):

$$T_k = \alpha T_{k-1} + (1 - \alpha) Z_k \quad (8)$$

де α – коефіцієнт експоненційного згладжування, який визначає, наскільки сильно нові дані впливають на оновлене значення температури. Чим більше α , тим більше враховується поточне значення температури, і тим менше вплив попередніх даних (9):

$$\alpha = \alpha_0 + k(3 - D_f) \quad (9)$$

де α_0 – базове значення коефіцієнта згладжування при штатному режимі роботи реактора ($D_f = 3$, $\alpha = 0.5$); k – коефіцієнт корекції, що визначає, наскільки швидко змінюється α 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 α 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 (10):

$$T_k = T_{ref} + (T_k - T_{sensor}) \cdot \left(1 + \beta \ln \left(\frac{3}{D_f} \right) \right), \quad (10)$$

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

Варіація коефіцієнту корекції β , який залежить від характеристик сенсора представлена в табл. 3.

Таблиця 3. Діапазон β в залежності від типу сенсора

Table 3. Range β depending on sensor type

Тип сенсора	Типова похибка	Діапазон β
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 (11):

$$T_k = T_{ref} + (T_k - T_{sensor}) \cdot \left(1 + \beta \ln \left(\frac{3}{D_f} \right) \right), \quad (11)$$

де γ – 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 (12):

$$X_k = X_0 + K_T (1 + \nu(3 - D_f))(T_k - T_0), \quad (12)$$

де X_0 – базове значення параметра; K_T – коефіцієнт температурної компенсації; T_k – поточна температура; T_0 – номінальна температура; ν – 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 відводять 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 (13):

$$T_{per} = T_{nom} \cdot \left(1 - \mu \ln \frac{3}{D_f} \right), \quad (13)$$

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

Гнучкий параметр μ допомагає налаштовувати реакцію системи на зміну неоднорідності температурного поля.

Його значення підбирається залежно від режиму роботи реактора (стабільний, передаварійний, аварійний). Чим вище μ , 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 (14):

$$T_{t+1} = mT_t \cdot b \left(1 - \psi \ln \frac{3}{D_f} \right), \quad (14)$$

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; ψ – коефіцієнт чутливості прогнозу до змін фрактальної розмірності температурного поля.

Значення ψ визначається емпірично та залежить від того, наскільки чутливою має бути система до змін фрактальної розмірності (табл. 3).

Таблиця 4. Значення коефіцієнту ψ

Table 4. Values of the coefficient ψ

Рівень чутливості	Значення ψ	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* (15):

$$P_t = P_{\max} \cdot \frac{T_t - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \left(1 - \sigma \ln \frac{3}{D_f} \right) \quad (15)$$

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; σ – коефіцієнт, що регулює вплив фрактальної розмірності на потужність (чим більше σ , 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* (16):

$$T_{t+1} = W_0 + \sum W_i f(D_f, T_t) + \varepsilon \quad (16)$$

де W_0, W_i – вагові коефіцієнти моделі; $f(D_f, T_t)$ – фрактальна функція, що враховує структурну складність температурного поля; ε – похибка прогнозу.

Ця модель дозволяє виявляти тенденції змін температури теплоносія, що випереджають аварійні нештатні ситуації.

На рис. 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.

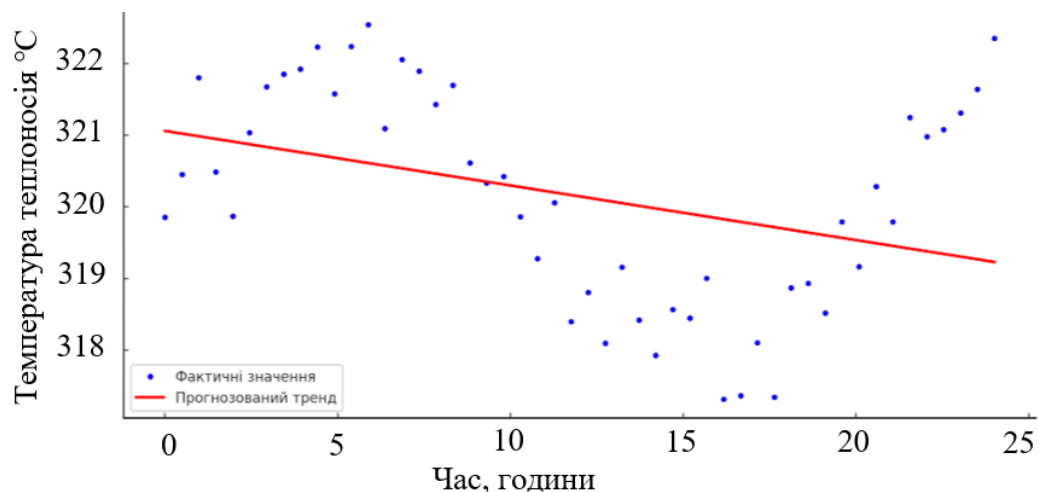


Рис. 2. Динаміка зміни температури теплоносія

Fig. 2. Dynamics of changes in coolant temperature

На рис. 3 представлена кореляція між температурою теплоносія та потужністю реактора.

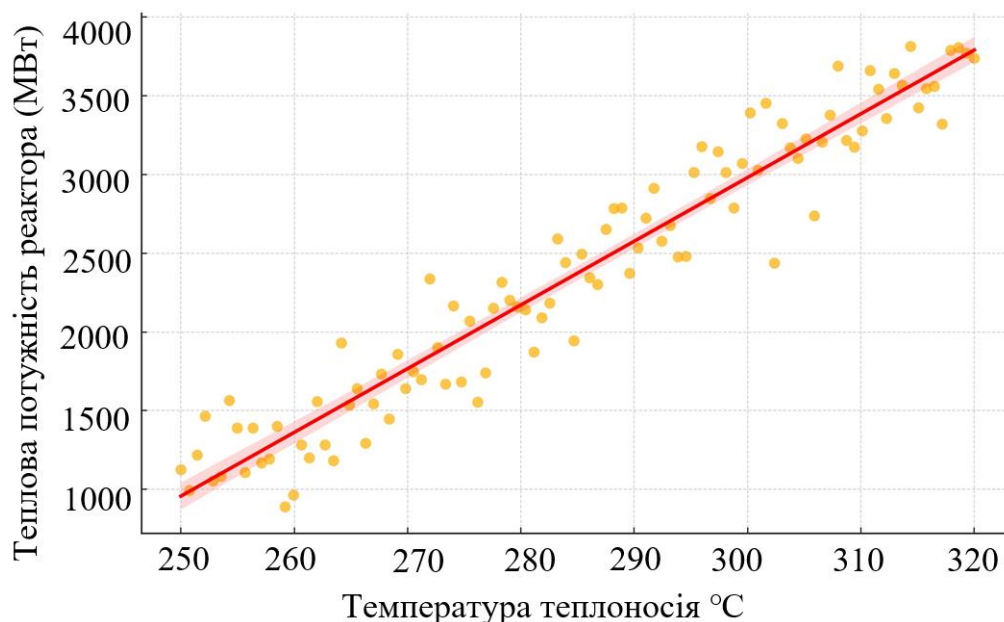


Рис.3. Кореляція між температурою та потужністю

Fig. 3. Correlation between temperature and power

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 перегріву. При критичних відхиленнях температура теплоносія порівнюється з прогноною 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 контуру 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.

Обговорення результатів дослідження.

Отримані результати дослідження підтверджують наявність кореляційного зв'язку між температурою теплоносія та потужністю реактора ВВЕР-1000, що узгоджується з фізичними моделями теплопередачі в першому контурі. Використання фрактально-кластерного аналізу дозволило виявити просторово-часові закономірності в розподілі температури, що сприяє кращому розумінню процесів теплообміну в активній зоні та трубопроводах першого контуру.

Запропонований метод моніторингу температурних флуктуацій виявився ефективним для виявлення відхилень у зонах нагріву, які можуть свідчити про нерівномірний розподіл теплоносія або локальні порушення циркуляції. Зокрема, результати дослідження показали, що формування стійких високотемпературних кластерів може передувати кризі тепловіддачі, що є критично важливим для забезпечення безпечної експлуатації реакторної установки. Виявлено, що при наближенні температури теплоносія до граничних значень (близько 336°C) зростає ймовірність

появи локальних зон із підвищеною температурою, які можуть призвести до прискореного старіння матеріалів та погіршення ефективності теплопередачі.

Результати аналізу також продемонстрували, що традиційні методи контролю температури, які базуються на точкових вимірюваннях, не завжди враховують динаміку змін температурного поля. Фрактальний підхід дозволяє прогнозувати розвиток теплових відхилень, аналізуючи самоподібні структури температурного розподілу. Це відкриває нові можливості для вдосконалення інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, оскільки прогнозний аналіз у режимі реального часу дозволяє завчасно реагувати на потенційно небезпечні зміни.

Практичне застосування отриманих результатів дозволяє не лише підвищити точність контролю температурного режиму, але й адаптувати параметри роботи реактора під змінні умови експлуатації. Наприклад, впровадження автоматизованих алгоритмів коригування циркуляції теплоносія на основі аналізу температурних кластерів може сприяти зменшенню навантаження на обладнання та продовженню його експлуатаційного ресурсу.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність застосування фрактально-кластерного аналізу для підвищення ефективності контролю температурних процесів у першому контурі енергоблоку АЕС. Запропонована методика може бути інтегрована в сучасні інформаційно-керуючі системи ПТК АСУ ТП для покращення безпеки та стабільності роботи енергоблоків АЕС.

Висновки

Виявлено, що при досягненні температурного порогу 336°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°C спостерігається збільшення зносу конструкційних матеріалів корпусу реактора на 25%, що вимагає посиленого контролю цих параметрів. Виявлено, що інтеграція методів прогнозного 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.

REFERENCES

1. S. Kiss, S. Lipcsei, “Analysis of propagating temperature perturbations in the primary circuit of PWRs,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 85, pp. 1167–1174, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.08.001>
2. Y. Xu, H. Jing, L. Xu, Y. Han, L. Zhao, “Microstructural evolution and oxidation behaviour of CF8A austenitic stainless steel during corrosion fatigue in a simulated pressurised water reactor environment,” *Corrosion Science*, Vol. 163, p. 108286, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108286>
3. S. M. Mostafavi, G. R. Ansarifard, “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*, Vol. 161, p. 108413, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108413>

4. G. R. Ansarifar, "Control of the nuclear steam generators using adaptive dynamic sliding mode method based on the nonlinear model," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 88, pp. 280–300, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.11.014>
5. J. Zhang, H. Xia, Y. Zhu, Y. Fu, "Research on sensor fault tolerance technology in nuclear power plant control system," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 207, p. 110714, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110714>
6. A. A. Amin, K. M. Hasan, "A review of Fault Tolerant Control Systems: Advancements and applications," *Measurement*, Vol. 143, pp. 58–68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.083>
7. T. Guilbaud, C. Fiorina, S. Lorenzi, A. Scolaro, F. Carminati, D. Maire, A. Pautz, "Investigating the Functional Mock-up Interface as a Coupling Framework for the multi-fidelity analysis of nuclear reactors," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 169, p. 105022, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.105022>
8. H. Shao, Z. Gao, X. Liu, K. Busawon, "Parameter-varying modelling and fault reconstruction for wind turbine systems," *Renewable Energy*, Vol. 116(B), pp. 145–152, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.083>
9. A. F. Flores, M. Rzehulka, G. Mazzini, "Influence of mixed core in the radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 417, p. 112858, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858>
10. J. Bae, G. Kim, S. J. Lee, "Real-time prediction of nuclear power plant parameter trends following operator actions," *Expert Systems with Applications*, Vol. 186, p. 115848, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115848>
11. A. Baybulatov, A. Poletikin, M. Byvaykov, "NPP Upper Level Control System Databases: The Problem of Making Changes," *17th International Conference on Management of Large-Scale System Development*, pp. 1–5, 2017. <https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739603>
12. A. Ayodeji, M. Mohamed, L. Li, A. Buono, I. Pierce, H. Ahmed, "Cyber security in the nuclear industry: A closer look at digital control systems, networks and human factors," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 161, p. 104738, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104738>
13. P. Budanov, E. Khomiak, I. Kyrysov, K. Brovko, S. Kalnoy, O. Karpenko, "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*, Vol. 4(8(118)), pp. 60–70, 2022. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>
14. P. Budanov, Yu. Oliinyk, A. Cherniuk, K. Brovko, "Dynamic Fractal Cluster Model of Informational Space Technological Process of Power Station," *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Vol. 221, pp. 141–155, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11
15. P. Budanov, Yu. Oliinyk, A. Cherniuk, K. Brovko, "Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters," *AIP Conference Proceedings*, p. 040015, 2024. Iraq, Al-Samawa: Al-Furat Al-Awsat Technical University. <https://doi.org/10.1063/5.0191648>
16. Z. Chen, H. Wu, Y. Chen, L. Cheng, B. Zhang, "Patrol robot path planning in nuclear power plant using an interval multi-objective particle swarm optimization algorithm," *Applied Soft Computing*, Vol. 116, p. 108192, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108192>
17. D. A. Ejigu, X. Liu, "Dynamic modeling and intelligent hybrid control of pressurized water reactor NPP power transient operation," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 173, p. 109118, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109118>
18. E. Jharko, E. Abdulova, K. Chernyshov, "Some Aspects of Intelligent Human-Operators Decision Support Systems for NPP," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 55(9), pp. 204–209, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.036>

19. J. Li, M. Lin, Y. Li, X. Wang, "Transfer learning network for nuclear power plant fault diagnosis with unlabeled data under varying operating conditions," *Energy*, Vol. 254(B), p. 124358, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124358>
20. K. S. Son, J. W. Lee, S. H. Seong, "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*, Vol. 55(8), pp. 2952–2965, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.05.006>

Brovko Kostiantyn *Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent;
V. N. Karazin Kharkiv National University; 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022*

Budanov Pavlo *Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent;
V. N. Karazin Kharkiv National University; 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022*

Vynokurova Nataliia *assistant lecturer;
V. N. Karazin Kharkiv National University; 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022*

Intelligent system for monitoring the temperature regime of the primary circuit of a nuclear power plant power unit based on fractal-cluster analysis

Actuality. Ensuring the effective and safe operation of nuclear power units requires constant monitoring of the temperature parameters of the primary circuit. Of particular importance is the detection of non-standard coolant operating modes and the prevention of heat transfer crises that can lead to accidents. Modern methods of monitoring the temperature regime do not always take into account the complex spatial structure of thermal processes, which reduces their efficiency. Therefore, there is a need to improve the methods of analyzing the temperature field based on the latest approaches, in particular fractal-cluster analysis.

Purpose. Development and improvement of methods for analyzing the temperature field of the first circuit of the VVER-1000 reactor plant, taking into account fractal-cluster features, to increase 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 the power unit of the nuclear power plant.

Research methods. The work uses fractal analysis methods to study temperature fluctuations in the primary circuit of the reactor. A correlation analysis was conducted to establish the relationship between the coolant temperature and the reactor power level. A comparative analysis of existing temperature monitoring systems was performed with further data generalization and formulation of proposals for the integration of new approaches into information and control systems of nuclear power plants.

Results. A close relationship between the temperature parameters of the coolant and the dynamics of the reactor plant operation was shown. A new monitoring method was proposed that takes into account the cluster structure of thermal processes and allows identifying potential crisis zones in heat transfer. The method provides increased sensitivity to changes in the temperature field and can be used for predictive analysis in real time. The advantages of integrating such an approach into the power unit control system were determined.

Conclusions. The proposed method of fractal-cluster analysis of the temperature field allows increasing the efficiency of control over thermal processes in the first circuit of the power unit of a nuclear power plant. It contributes to increasing the reliability of reactor equipment, reducing the risks of crisis situations, and extending the service life. The results obtained can be used to improve control systems and ensure the overall safety of nuclear power units.

Keywords: *fractal cluster analysis, information and control systems, monitoring, forecasting, nuclear facility safety*