

## ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРШОГО КОНТУРУ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ВВЕР-1000

К. Ю. Бровко, О. М. Пономаренко, Д. Р. Подопригора  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Сучасні енергоблоки атомних електростанцій (АЕС), зокрема з реакторами типу ВВЕР-1000, характеризуються високою складністю теплогідрравлічних процесів першого контуру. Моніторинг температури теплоносія на різних ділянках контуру є критично важливим для забезпечення безпеки роботи ядерного реактора. Навіть незначні локальні коливання температури можуть призводити до формування критичних теплових градієнтів, які здатні спричинити перегрів окремих зон активної зони або трубопроводів, що підвищує ризик аварійних ситуацій. Дослідження [1] показують, що температурне поле першого контуру має фрактально-кластерну структуру, де локальні відхилення температури утворюють просторово пов'язані групи або кластери. Ідентифікація та аналіз таких кластерів дозволяє не лише прогнозувати потенційні критичні стани, але й оптимізувати розміщення контрольних точок для більш точного моніторингу та оперативного реагування на зміни режиму. В роботі [2] наведено приклад фрактально-кластерного розподілу температурних змін першого контуру, що наочно демонструє концентрацію теплових відхилень у окремих секторах активної зони.

Моніторинг температури здійснюється за допомогою п'яти основних груп датчиків: на вході та виході теплоносія з активної зони, на головних циркуляційних насосах, на магістральних трубопроводах першого контуру та безпосередньо в активній зоні через внутрішньоактивні датчики тепловиділяючих елементів. Використання термоперетворювачів опору та термопар забезпечує поєднання високої точності вимірювань із швидкою реакцією на локальні температурні флуктуації. Дані з усіх сенсорів інтегруються в інформаційно-керуючу систему, де вони піддаються фрактально-кластерному аналізу для виявлення закономірностей у просторі та часі, як показано на рис. 1. Для підвищення точності вимірювань застосовуються сучасні методи цифрової обробки сигналів, включаючи адаптивні фільтри шуму, компенсацію систематичних похибок та алгоритми Калмана для прогнозування та корекції даних у режимі реального часу. Математичне моделювання температурного поля дозволяє оцінювати масштаби теплових відхилень, ймовірність утворення критичних локальних перегрівів та ефективність системи керування тепловим режимом першого контуру. Фрактально-кластерний підхід дає змогу не лише виявляти локальні відхилення, а й оцінювати їх потенційний вплив на експлуатаційну безпеку. Результати моделювання підтверджують, що локальні температурні відхилення на рівні 2–3 % можуть збільшувати тепловий градієнт у певних зонах на 15–20 %, що потенційно створює умови для формування перегріву або підвищеного теплового навантаження на обладнання.



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

Впровадження таких методів дозволяє підвищити оперативність реагування на теплові зміни, стабілізувати теплогідрравлічні процеси та підвищити рівень безпеки енергоблоків АЕС. Крім того, це забезпечує підвищену ефективність експлуатації устаткування, продовження терміну його служби та зниження ймовірності аварійних ситуацій. Перспективи розвитку систем моніторингу полягають у поєднанні фрактально-кластерного аналізу з алгоритмами штучного інтелекту для автоматичного прогнозування критичних станів та адаптивного керування режимами роботи першого контуру.

Таким чином, інтеграція фрактально-кластерного підходу в системи контролю температури реакторних установок відкриває нові можливості для підвищення безпеки та надійності роботи АЕС, забезпечуючи науково обґрунтовану оцінку ризиків та оптимізацію технологічних процесів.

### Список літератури

- [1] Бровко К. Ю., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. Комп'ютерна симуляція розвитку аварії на Чорнобильській АЕС із застосуванням інтерактивного тренажера-симулятора // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2025. – Вип. 1(10). – С. 31–39. – URL: [https://doi.org/10.20998/EREE.2025.1\(10\).329980](https://doi.org/10.20998/EREE.2025.1(10).329980)
- [2] 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. 15–34. – URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02>