

## ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ОСНОВІ СИСТЕМНО-КЛАСТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

К. Ю. Бровко, П. Ф. Буданов, Ю. С. Олійник

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Сучасна атомна енергетика є критично важливою для енергетичної безпеки держави, а підвищення її надійності та безпеки вимагає впровадження передових інформаційних технологій, зокрема, концепції цифрового двійника. Актуальність дослідження зумовлена відсутністю комплексної моделі, яка б інтегрувала всі ключові підсистеми енергоблоку в єдину цифрову платформу, що враховує його структурну складність [1]. Метою даної роботи була розробка саме такої імітаційної моделі цифрового двійника технологічного процесу енергоблоку атомної електростанції (АЕС) на основі системно-кластерного підходу з використанням величини фрактальної розмірності.

оцінки структурної складності кожного підкластера. Було отримано характерні значення: керування потужністю ( $d_f \sim 1.584$ ); системи захисту ( $d_f \sim 1.0$ ); регулювання теплоносія ( $d_f \sim 1.83$ ); аварійної зупинки ( $d_f \sim 1.585$ ). Для кожного підкластера був визначений нормований діапазон цієї величини, а відхилення поточного значення  $d_f$ , від цього діапазону є сигналом про структурну деградацію або перенавантаження системи, тобто про передаварійний стан.

Практична реалізація моделі була виконана шляхом створення функціонального цифрового двійника у вигляді програмно-апаратного комплексу. Його архітектура, що реалізує алгоритм, включає модулі збору даних, структурної ідентифікації, порівняння та візуалізації. Було розроблено інтерактивний інтерфейс, який забезпечує моніторинг основних технологічних параметрів, візуалізацію стану кластерної структури та відображає динаміку зміни величини фрактальної розмірності в режимі реального часу. Таким чином, розроблена модель цифрового двійника дозволяє не лише імітувати поведінку енергоблоку, але й виконувати проактивну діагностику на основі аналізу структурної цілісності системи управління.

Отримані результати демонструють високу ефективність системно-кластерного підходу та використання фрактальної розмірності як інноваційного інструменту для підвищення безпеки та надійності АЕС.

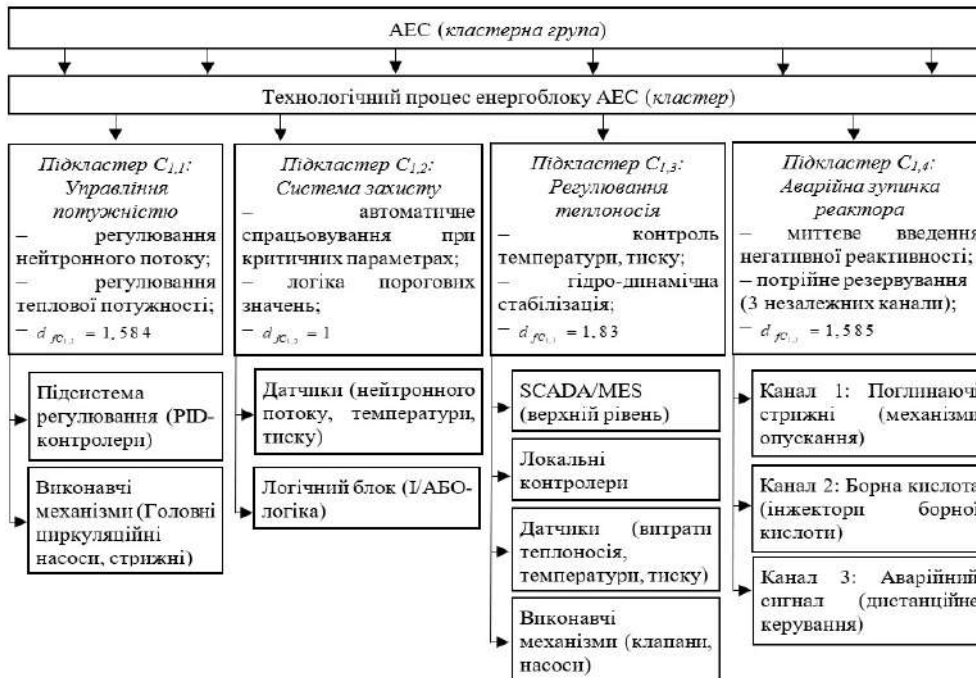


Рис. 1. Ієрархічна структура системи управління енергоблоком АЕС на основі системно-кластерного підходу

Для її досягнення було виконано моделювання технологічного процесу, де енергоблок представлено як ієрархічну структуру з головним кластером, що включає чотири ключові підсистеми: керування потужністю, захист реактора, регулювання теплоносія та аварійне глушіння. Математичний опис цих підсистем базувався на рівняннях точкової нейтронної кінетики, дискретно-логічних алгоритмах, рівнянні теплогідродинаміки та моделі імпульсної реактивності. Стан всієї системи в цілому описувався агрегованою змінною та функцією реакції системи, які враховують вплив усіх підкластерів, керуючих сигналів та зовнішніх збурень [2]. Наступним кроком був розгляд ієрархічної структури системи управління для реалізації алгоритму цифрового двійника (рис. 1). Ключовим результатом стало впровадження фрактальної розмірності  $d_f$ , як кількісного інструменту для

### Список літератури

- [1] Louis, H. K. Assessment of neutronic safety parameters of VVER-1000 core under accident conditions. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, Vol. 132, 103609. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103609>
- [2] Буданов П. Ф., Великогорський О. В., Винокурова Н. Д. Забезпечення кількісної оцінки якості управління технологічним процесом енергоблоку АЕС засобами цифрового двійника. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – № 3 (25). – С. 3–12. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>.