

Г. І. Шараєвський*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

Методологія оперативної діагностики корозійних пошкоджень оболонок твелів у реакторах типу ВВЕР на основі штучної нейронної мережі

Ключові слова:

превентивна діагностика,
корозійні пошкодження,
початок кипіння теплоносія,
спектри нейтронного шуму,
розпізнавання спектральних
сигнатур,
автоматичне розпізнавання
діагностичних сигналів,
штучна нейронна мережа,
топологія Кохонена

Розглянуто результати практичної реалізації запропонованого автором теоретичного підходу до вирішення проблемного завдання раннього виявлення передаварійного теплового стану оболонок твелів у легководному реакторі з докритичними термодинамічними параметрами теплоносія. Реалізація такого підходу забезпечує автоматичне виявлення початкових етапів виникнення на поверхні тепловіддачі твелів перших проявів початку генерації парової фази на їхніх поверхнях. З позицій математичної формалізації запропонованого діагностичного підходу його фізичний принцип полягає у своєчасному безконтактному розпізнаванні режиму активації перших центрів пароутворення на основі комп'ютерної ідентифікації спектральних сигнатур діагностичних сигналів цього аномального температурного стану поверхонь тепловіддачі твелів. Комп'ютерна реалізація цього превентивного діагностичного підходу передбачає використання обчислювальних алгоритмів для забезпечення автоматичного розпізнавання сигналів нейтронного шуму в активній зоні енергетичного ядерного реактора типу ВВЕР у багатомірному просторі спектральних ознак. Як такі ознаки теплогідравлічних режимів, що підлягають автоматичному розпізнаванню, запропоновано використовувати кінцеву множину спектральних складових шумових діагностичних сигналів, які реєструються на виходах вимірювальних сенсорів, зокрема електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів.

Вступ

Сучасні програмно-технічні комплекси діагностики обладнання АЕС України та інших країн світу забезпечують лише надання експлуатаційних даних для оперативного персоналу, який евристично формує діагностичні рішення щодо поточного технічного стану елементів головного обладнання ядерного енергоблоку. У більшості випадків можливих небезпечних пошкоджень цього обладнання, зокрема руйнації твелів ядерного реактора (ЯР), можна уникнути завчасним попередженням цих аварій завдяки

ранньому автоматичному виявленню відповідних нештатних експлуатаційних режимів у головному обладнанні ядерної енергоустановки. Очевидно, що для автоматизації процесу формування діагностичних рішень необхідно створити програмні засоби:

- 1) розпізнавання режимів експлуатації обладнання АЕС за спектральними параметрами діагностичних сигналів;

- 2) ідентифікації початкових фаз переходу цього обладнання до нештатних режимів його експлуатації.

Реалізація першої із зазначених функцій ускладнюється обмеженням обсягом навчальних даних,

© Г.І. Шараєвський, 2025. Ліцензія CC BY 4.0

стохастичною природою діагностичних сигналів та високим рівнем їхньої зашумленості маскуючими технологічними шумами. З огляду на ці чинники використання відомих методів статистичного, геометричного та структурного розпізнавання таких діагностичних об'єктів значно ускладнюється або взагалі є неможливим. У той же час нейромережевий підхід до їхньої ідентифікації, зокрема на основі самоорганізації штучних нейронних мереж (ШНМ), принципово дає змогу забезпечити функціонування такої системи розпізнавання з використанням обмежених навчальних даних та в реальному часі.

Використання карт самоорганізації в структурі ШНМ із топологією Кохонена загалом відповідає характеру сформульованого вище завдання автоматичної оперативної діагностики важливих для безпеки елементів головного обладнання АЕС. Методи навчання ШНМ цього типу досліджувались Т. Кохоненом, Р. Х. Садиховим, М. Є. Ваткіним та іншими розробниками діагностичних комп'ютерних комплексів відповідно до даних [1]. Проте запропоновані цими дослідниками алгоритми функціонування карт самоорганізації не тільки не забезпечують високої надійності розпізнавання, але й не дають також змоги забезпечити самоадаптацію ШНМ в умовах апіорної невизначеності класів, що підлягають ідентифікації. Утім саме такі апіорні інформаційні обмеження відповідають реальним умовам функціонування систем розпізнавання при ідентифікації аномальних та передаварійних режимів експлуатації в елементах АЕС. Крім того, алгоритми самоадаптації ШНМ в умовах апіорної невизначеності класів до теперішнього часу фактично відсутні.

Таким чином, розробка нейромережевих алгоритмів та створення на їхній основі прикладних програмних засобів для автоматичної діагностики обладнання АЕС у реальному часі є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого забезпечує необхідні передумови для суттєвого підвищення експлуатаційної безпеки ядерних енергоблоків.

Метою цієї роботи є розробка нейромережевих діагностичних алгоритмів та створення на їхній основі програмних засобів для оперативної діагностики активних зон (АкЗ) реакторів типу ВВЕР. Зокрема це стосується корозійних пошкоджень оболонок твелів цих реакторів, що спричиняють виникнення в тепловидільних збірках (ТВЗ) нерегламентних теплогідравлічних процесів (ТГП).

Проблеми оперативної діагностики теплогідравлічних режимів водоохолоджуваних ЯР

Експлуатація АкЗ сучасних водоохолоджуваних (ВО) ЯР реалізується на рівні режимних параметрів, близьких до максимально допустимих. Особливо це стосується густини теплового потоку на поверхні твела, яка досягла гранично можливого рівня. Разом з тим, з огляду на пріоритет підвищення техніко-економічних показників ядерного енергоблоку, імовірність виникнення аномальних і передаварійних режимів теплообміну та подальшого їхнього розвитку до аварійних ТГП у ВО ЯР суттєво зросла.

При цьому для ВО ЯР, які складають переважну більшість парку сучасних АЕС, позаштатними режимами теплообміну є аномальні, передаварійні та аварійні режими генерації парової фази під час кипіння теплоносія на поверхнях твелів. Найбільшу небезпеку в базових експлуатаційних режимах зазначених ЯР становить виникнення криз тепловіддачі 1-го та 2-го типу при кипінні теплоносія на поверхнях твелів в АкЗ, відповідно до умов експлуатації некиплячих (ВВЕР, PWR) та киплячих (РБМК, BWR) реакторів. Відомо, що в умовах виникнення криз тепловіддачі на поверхні кипіння спостерігаються такі фізичні процеси: різкий стрибок температури на кілька сотень або десятків градусів; руйнування оболонок твелів; викид високорадіоактивних продуктів поділу безпосередньо в теплоносії.

У цьому контексті та з точки зору оцінки характеру аварійних режимів теплообміну в АкЗ варто звернути увагу на головні фізичні особливості кризи тепловіддачі 1-го типу, що відповідає умовам переходу пазиркового кипіння в аварійний плівковий режим. При цьому також необхідно охарактеризувати фізику розвитку кризових явищ 2-го типу, викликаних пересиханням пристінної рідинної мікроплівки теплоносія та початком переходу дисперсно-кільцевої структури парорідинного потоку до його дисперсного режиму. При цьому слід відзначити головні проблеми автоматичної діагностики кризових явищ у цих умовах:

1. Існуючі емпіричні розрахункові кореляції для визначення інтегральної характеристики кризи тепловіддачі, а саме аварійного рівня густини теплового потоку $q_{кр}$ на поверхнях твелів, тобто критичного теплового потоку (КТП), не можуть бути ефективно використані для надійного оперативного прогнозування криз тепловіддачі 1-го та 2-го типу. Причина

цього полягає не тільки в недостатній надійності залежностей для емпіричного розрахунку КТП, але й у відсутності оперативної інформації щодо низки важливих локальних параметрів процесу тепловіддачі на поверхнях твелів. При цьому маються на увазі, насамперед, розподіли масової швидкості теплоносія та рівні його ентальпії в суттєво нерівноцінних теплогідрравлічних комірках ТВЗ.

2. Крім передаварійних ТГП, формування яких у ТВЗ відповідає початковим фазам розвитку кризових явищ на поверхнях твелів, оперативній автоматичній ідентифікації підлягає також низка потенційно небезпечних теплогідрравлічних (ТГ) аномалій. До них, зокрема, належать: початок кипіння теплоносія; структури течії діабатного парорідинного потоку; позаштатні рівні масового паровмісту; режими термоакустичної нестійкості теплоносія в ТВЗ. При цьому слід зазначити, що сучасні технічні засоби моніторингу технічного стану АкЗ ВО ЯР не забезпечують виявлення зазначених ТГ аномалій та передаварійних режимів теплозйому з поверхонь твелів.

3. Стохастичний характер [2] сигналів датчиків теплофізичних параметрів АкЗ ЯР, зокрема нейтронного потоку, тиску теплоносія, температури тощо, обумовлений імовірнісною природою нейтронних та ТГП в АкЗ ВО ЯР. Показово, що випадкова структура цих технологічних параметрів проявляється в наявності шумових флуктуаційних складових («реакторних шумів») на виході відповідних вимірювальних каналів.

З огляду на вищезазначене далі мають бути конкретизовані актуальні завдання оперативної діагностики АкЗ ВО ЯР.

Актуальні завдання оперативної діагностики ТГП в АкЗ ВО ЯР

У результаті досліджень, що були виконані в останні десятиліття (R. Urig, L. Blumentritt, R. Fuge, A. I. Могільнер та ін. [3]), було з'ясовано, що в реакторних шумах міститься суттєва діагностична інформація про характер ядерно-фізичних і теплових процесів в АкЗ ВО ЯР. У той же час ефективні методи вилучення цієї інформації зі стохастичних діагностичних сигналів та використання відповідних реакторних шумів для технологічного контролю реакторної установки (РУ) поки відсутні. У цьому зв'язку слід відзначити, що математичне забезпечення детермінованого типу, яке використовується в сучасних інформаційних моніторингових комп'ютерних комплексах системи підтримки операторів (СПО)

АЕС, зокрема ALLY, SPDS, pwVDN (США); KUS'95, PC SUS (ФРН); DMS, PODIA (Японія); СКУД (Росія), не відповідає ймовірнісній природі нейтронно-фізичних та теплофізичних процесів в АкЗ ВО ЯР, включаючи передаварійні та аномальні теплогідрравлічні режими. У всіх зазначених сучасних моніторингових системах, зокрема в системі внутрішньореакторного контролю (СВРК), діагностичні сигнали піддаються частотній фільтрації, амплітудній дискримінації, осередненню тощо, у результаті чого ймовірнісна структура цих сигналів та діагностична інформація, що міститься в них, втрачаються. Слід відзначити, що реалізовані за останні роки для вирішення діагностичних завдань методичні підходи, що були запропоновані різними авторами, виявились безуспішними. Так, детерміновані підходи до моніторингу умов виникнення кризи тепловіддачі 1-го типу, запропоновані останніми роками в Одеському політехнічному інституті (О. Ю. Погосов, О. В. Корольов), реально не можуть бути використані для реалізації завдань оперативної діагностики ТГП, що мають місце в АкЗ ВО ЯР. Так, зокрема, слід відзначити, що відомі спроби виявлення КТП за допомогою шумових діагностичних сигналів (А. М. Кічигін та Л. О. Кесова, Є. І. Несіс та Б. М. Дорофєєв, А. І. Могільнер, В. І. Мельников, R. Fuge та ін. [3]) теж не дали практичних результатів.

Таким чином, удосконалення функціональних можливостей сучасних інформаційних моніторингових підсистем має зосереджуватися на автоматизації процедур інформаційної підтримки операторів ядерних енергоблоків. При цьому основною функцією, яку необхідно розробити і реалізувати в перспективних комп'ютерних діагностичних системах, слід вважати автоматичне розпізнавання аномальних та передаварійних ТГП у ТВЗ. Надійна оперативна (тобто в режимі реального часу – online) ідентифікація нештатних режимів експлуатації АкЗ ВО ЯР має бути забезпечена на основі інформації, що міститься в реакторних шумах. Очевидно, що вирішення цих завдань вимагає проведення циклу досліджень для розробки нових математичних і програмних засобів, що мають скласти основу інтелектуалізації діагностичних функцій спеціалізованих моніторингових обчислювальних комплексів СПО наступного покоління. Один з таких підходів запропоновано в цій роботі. З огляду на це необхідність адекватного врахування характеру фізики генерації парової фази на окремому центрі пароутворення, що за певних умов є здатним активуватися на поверхнях твелів, зумовлює

необхідність системного аналізу теплофізичних процесів, що реалізуються на цій поверхні теплозйому, яка охолоджується плинном теплоносія в ТВЗ ВО ЯР.

Мікродинаміка руйнації захисного пасивуючого оксидного шару на поверхні твела

Відомо [3, 4], що потенційна небезпека неконтрольованого переходу режиму теплозйому з поверхонь твелів в АкЗ ЯР типу ВВЕР від конвективної тепловіддачі до розвиненого бульбикового кипіння, а згодом і до його плівкової форми (тобто до кризи тепловіддачі 1-го типу) об'єктивно зумовлює необхідність раннього виявлення початку кипіння (ПК) теплоносія. Проте має бути відзначений також і матеріалознавчий аспект впливу мікродинаміки процесу кипіння на адгезію захисної пасивуючої оксидної плівки на зовнішній поверхні оболонки твела. Як свідчить низка експериментальних досліджень, проаналізованих у монографії [5], на поверхні тепловіддачі киплячого апарата, включаючи також і ТВЗ, виникають пульсації температури цієї поверхні, що мають достатньо високу частоту та амплітуду. Дослідження показали [4], що ці коливальні параметри процесу кипіння залежать від густини теплового потоку на поверхні твела, масової швидкості теплоносія в певній теплогидравлічній комірці ТВЗ, а також довжини економайзерної ділянки до настання режиму ПК у цій комірці. За останні роки теплофізичні дослідження мікродинаміки процесу кипіння, проаналізовані у [4, 5], показали, що, насамперед, в умовах фіксованої масової швидкості теплоносія частота пульсацій температури під діючими активними центрами пароутворення тим вище, чим більша густина теплового потоку. Крім того, у вищенаведених роботах було обґрунтовано гіпотезу з безпеки експлуатації твелів. Згідно з цією гіпотезою скорочення ресурсу експлуатації поверхні кипіння в кожному високофорсованому теплообмінному апараті, включаючи ТВЗ реакторів типу ВВЕР та PWR, фізично є наслідком мікрогидравлічних ударів, що виникають під час деградації парових утворень у процесі недогрітого кипіння. Крім того, додатковим чинником руйнації поверхні тепловіддачі в зоні ПК є термомеханічні напруження, що здатні проникати вглиб оболонки твела на всю її товщину.

Як ілюстрацію топології мікрошару в околиці діючого центру пароутворення на рис. 1, за даними роботи [5], зображено два типи парових утворень у режимі ПК: генерації парової фази в умовах вільної конвекції (а); кипіння теплоносія в парогенеруючому каналі (б). В обох випадках випаровування мікроша-

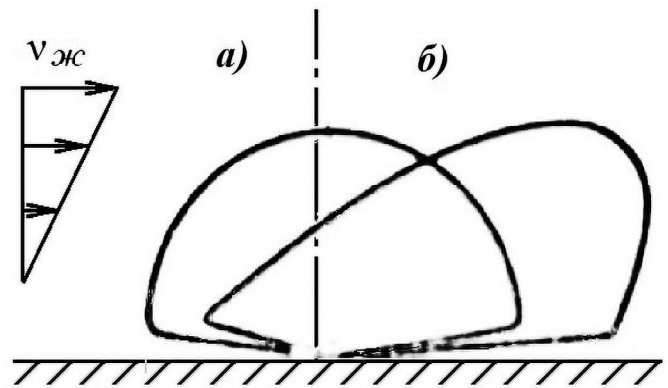


Рис. 1. Топологія мікрошару та поверхні парового бульбика в різних гідродинамічних умовах за даними [5]: а — вільна конвекція; б — кипіння в парогенеруючому каналі з відповідним профілем швидкості $V_{жс}$ у пристінковому шарі

ру всередину порожнини парового бульбика викликає зміну його форми та спричиняє локальні пульсації температури поверхні під діючим центром пароутворення, зумовлюючи відповідні флуктуації густини теплового потоку в цій зоні.

Таким чином, відповідно до даних роботи [5], однією з причин руйнації оболонки твела в зоні кипіння теплоносія є втомні термічні напруження, що виникають у матеріалі цирконієвої оболонки, яка вже могла зазнати руйнівного впливу водню в теплоносії, що й призвів до водневого окрихчування матеріалу цієї оболонки. Слід зазначити, що локальні пульсації температури поверхні кипіння в околиці діючого центру пароутворення досягають декількох десятків градусів та мають частоту, що становить кілька десятків герц. Параметри цих коливальних процесів залежать, головним чином, від густини теплового потоку, масової швидкості теплоносія та глибини його недогріву до температури насичення T_s . Як ілюстрацію кількісних характеристик такої мікродинаміки процесу кипіння на рис. 2 за даними [5] представлено результати експериментальних вимірювань динаміки процесу генерації парової фази під окремим діючим центром пароутворення. На рисунку представлено зареєстровані флуктуації: температури стінки киплячої поверхні (а); густини теплового потоку під діючим центром пароутворення (б).

Таким чином, за результатами аналізу фізико-хімічного впливу мікродинаміки процесу кипіння на розвиток локальної корозії нодулярного (тобто точкового) типу [6] слід зазначити:

1. Виникнення проникаючої корозії нодулярного типу є безпосередньо пов'язаним із процесом кипіння теплоносія на поверхні твела.

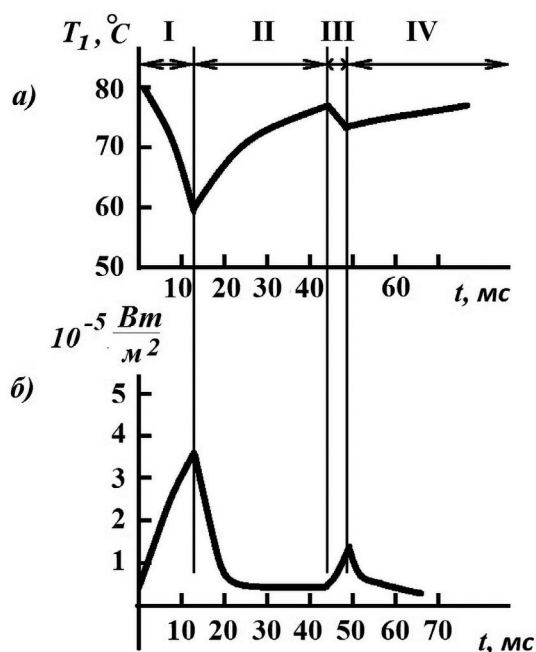


Рис. 2. Мікродинаміка кипіння під діючим центром пароутворення з локальними флуктуаціями:
а — температури стінки;
б — густини теплового потоку — за даними [5]

2. Скорочення експлуатаційного ресурсу поверхні твела є наслідком прискореної руйнації захисної пасивуючої плівки ZrO та розмивання накопиченого під нею корозійного продукту ZrO_2 , який не має адгезійних властивостей.

3. Руйнація захисної пасивуючої плівки ZrO на поверхні оболонки твела є наслідком розвитку в ній термомеханічних напруг у результаті флуктуацій температури в околиці активних центрів пароутворення та завдяки впливу мікрогідралічних ударів, що виникають у процесі деградації парових утворень.

4. Процес кипіння є важливим фізичним чинником розвитку проникаючої корозії нодулярного типу і з огляду на це підлягає оперативному виявленню.

5. Згідно з даними аналізу роботи [4], надійних методів розрахункового визначення режиму ПК в АкЗ ВО ЯР на сьогодні не існує.

6. Відповідно до даних [3], наявні системи діагностики РУ типу ВВЕР та PWR не вирішують завдань оперативного виявлення ПК в АкЗ цих реакторів.

7. З огляду на обмеженість функціоналу існуючих на сьогодні засобів діагностики обладнання АЕС, далі розглянуто запропонований у роботі [7] нейромережевий підхід до оперативного виявлення ПК в АкЗ ЯР типу ВВЕР. Методику нейтронно-фізичних вимірювань, що передували цій розробці, розглянуто в монографії [3].

Методологія побудови та архітектура нейромережевого діагностичного комплексу

У монографії [3] досліджено особливості фізичного взаємозв'язку між параметрами діагностичних сигналів, що реєструються на виходах електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів в АкЗ реактора ВВЕР-440, та фізичними закономірностями виникнення та розвитку ПК на поверхнях твелів у термометричній ТВЗ, що використовувалась у міжнародному експерименті [7] на АЕС «Райнсберг» (Німеччина). Відповідно до даних аналізу цих результатів слід відзначити:

1. Флуктуації нейтронного потоку в АкЗ реакторів типу ВВЕР зумовлені не тільки стохастичною природою нейтронно-фізичних процесів, вібраціями його внутрішньокорпусних елементів та іншими фізичними чинниками, але є також безпосередньо пов'язаними з коливаннями термалізаційних властивостей уповільнювача, зокрема внаслідок можливого переходу до процесу кипіння теплоносія на поверхні твела в нештатних умовах експлуатації РУ цього типу.

2. Існує фізичний взаємозв'язок між окремими інформаційно значущими спектральними діапазонами нейтронного шуму на виході електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів у структурі комплексу СВРК реактора типу ВВЕР та конкретними фізичними чинниками, що зумовлюють формування цих діапазонів у спектрах автоспектральної густини (АСГ) та когерентноспектральної густини (КСГ) нейтронного шуму в полосі частот $f = 1,6 \dots 40$ Гц.

3. Спектральний діапазон нейтронного шуму в АкЗ реактора типу ВВЕР, що відповідає частотній полосі $f = 10 \dots 40$ Гц, визначальною мірою зумовлюється процесами термалізації нейтронів, хоча саме інфранизькі спектральні складові в частотній полосі від $f = 0,05$ Гц до декількох герц містять діагностичну інформацію щодо виникнення аномальних та передаварійних теплогідравлічних процесів, включаючи ПК на поверхні твела [3].

4. Визначальною структурною особливістю АСГ нейтронного шуму, що реєструється в АкЗ реактора типу ВВЕР, в умовах відсутності кипіння теплоносія на поверхнях твелів є низькочастотна (досліджувався спектральний діапазон $f = 0,1 \dots 63,0$ Гц) випадкова $1/f$ -структура цих спектрів, що має характерні ознаки фліккер-шуму. Початок кипіння теплоносія в ТВЗ супроводжується пропорційним збільшенням інтенсивності спектральної густини складових АСГ нейтронного шуму на величину близько 20 %.

Як приклад на рис. 3 наведено дві типові спектральні реалізації діагностичних сигналів нейтронного шуму, що відповідають: а) класу А1, тобто конвективній тепловіддачі з поверхонь реальних твेलів в експериментальній ТВЗ реактора ВВЕР-440; б) аномальному режиму (клас А3) у цій ТВЗ, що відповідає пухирковому кипінню теплоносія в активній зоні цього реактора. Слід відзначити, що спектральні структури цих сигналів є суттєво подібними і в реальних умовах експертом-діагностом ідентифіковані бути не можуть. Таким чином, аномальний теплогидравлічний режим, що відповідає початку кипіння теплоносія на поверхні твела і становить клас А2, уможливно не може бути ідентифікований експертом-діагностом на основі візуального аналізу спектральної структури цього сигналу.

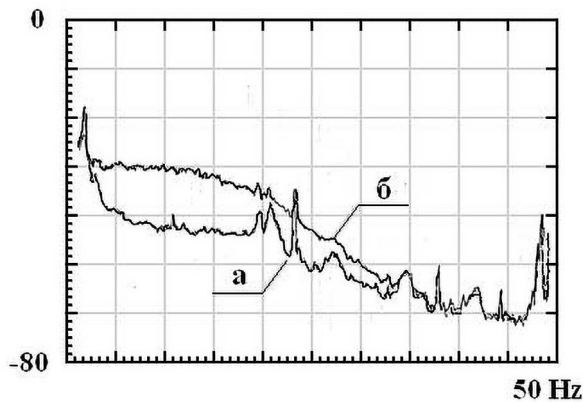


Рис. 3. Типові реалізації діагностичних сигналів нейтронного шуму: а — штатний режим (клас А1) конвективної тепловіддачі з поверхонь твелів в експериментальній ТВЗ реактора ВВЕР-440; б — аномальний режим (клас А3) у цій ТВЗ з пухирковим кипінням теплоносія — за даними [3]

Визначення межі між класами А1 та А2, що є невідомою експертам, у цій роботі запропоновано реалізувати на основі математичного підходу до визначення моменту розладки випадкового часового ряду [7]. При цьому останній утворено відповідною послідовністю рівнів спектральної повності в спектрах діагностичного сигналу нейтронного шуму в умовах збільшення теплової потужності реакторного каналу. Дослідження зазначених випадкових часових рядів, що були виконані в цій роботі, довели можливість їхньої ефективної апроксимації випадковими послідовностями авторегресійного типу. Так, якщо $w_1, w_2, \dots, w_N$ є проінтегрованою послідовністю авторегресії, то може бути записане рівняння

$$\nabla^d W_t = x_t, \quad \nabla^1 W_t = W_{t-1}, \quad x_t = \sum_{i=1}^p \Phi_i x_{t-i} + \varepsilon_t,$$

де ∇^d — оператор різності; d — порядок різності; p — порядок авторегресії; $\Phi_1, \dots, \Phi_p$ — коефіцієнти авторегресії; ε_t — незалежна гауссівська послідовність.

Аналіз послідовностей рівнів спектральної повності в інформаційно значущих інформаційних ознаках нейтронного шуму показав, що міжкласовий перехід супроводжується суттєвою зміною $(p+1)$ — мірного вектора параметрів моделі (1), тобто $\theta^T = (\Phi_1, \dots, \Phi_p, \sigma_\varepsilon)$. Формально, тобто з математичної точки зору, виявлення факту зміни цього вектора параметрів моделі авторегресії, а саме коефіцієнтів авторегресії $\Phi_1, \dots, \Phi_p$, дає змогу вирішити задачу виявлення початку міжкласового переходу.

Як відомо [3], характерною особливістю спектрального складу нейтронного шуму в АкЗ енергетичних ЯР є його низькочастотний характер. Показово, що в цьому сигналі є та особливість, що верхня спектральна межа флуктуацій нейтронного потоку в АкЗ ВО ЯР звичайно не перевищує 30–40 Гц. При цьому спектральні складові нейтронного шуму в частотній смузі вище кількох герц фізично зумовлені переважно локальними змінами термалізаційних властивостей уповільнювача, що проявляються разом із впливом інших фізичних ефектів. Розроблений свого часу в РНЦ «Курчатовський інститут» апаратно-програмний комплекс МІК [8], призначений для вимірювання та експериментального моніторингу параметрів нейтронного шуму (діапазон вимірюваних частот 0...200 Гц), який реєструється на виході електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів, був використаний для вимірювання спектральних параметрів нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР-70 на АЕС «Райнсберг» в описуваних експериментах. Зазначена синхронна реєстрація забезпечувалась фіксацією сигналів потоку нейтронів та сигналів датчиків температури поверхонь експериментальних твелів. Методика виконання описуваних експериментів розглянута в монографії [3].

На рис. 4 представлено схему результатів пошуку розладки в трьох спектральних каналах у момент міжкласового переходу від класу А1 до класу А2.

На цій же схемі наведено обчислені відповідно до запропонованого алгоритму параметри авторегресії відповідного часового ряду, зміна яких свідчить про наявність факту зміни статистичних властивостей цього ряду в момент зафіксованого міжкласового переходу. Слід зазначити, що спектральні канали для пошуку розладки були попередньо визначені експертом, виходячи з розглянутих вище фізичних особливостей процесу кипіння теплоносія на поверх-

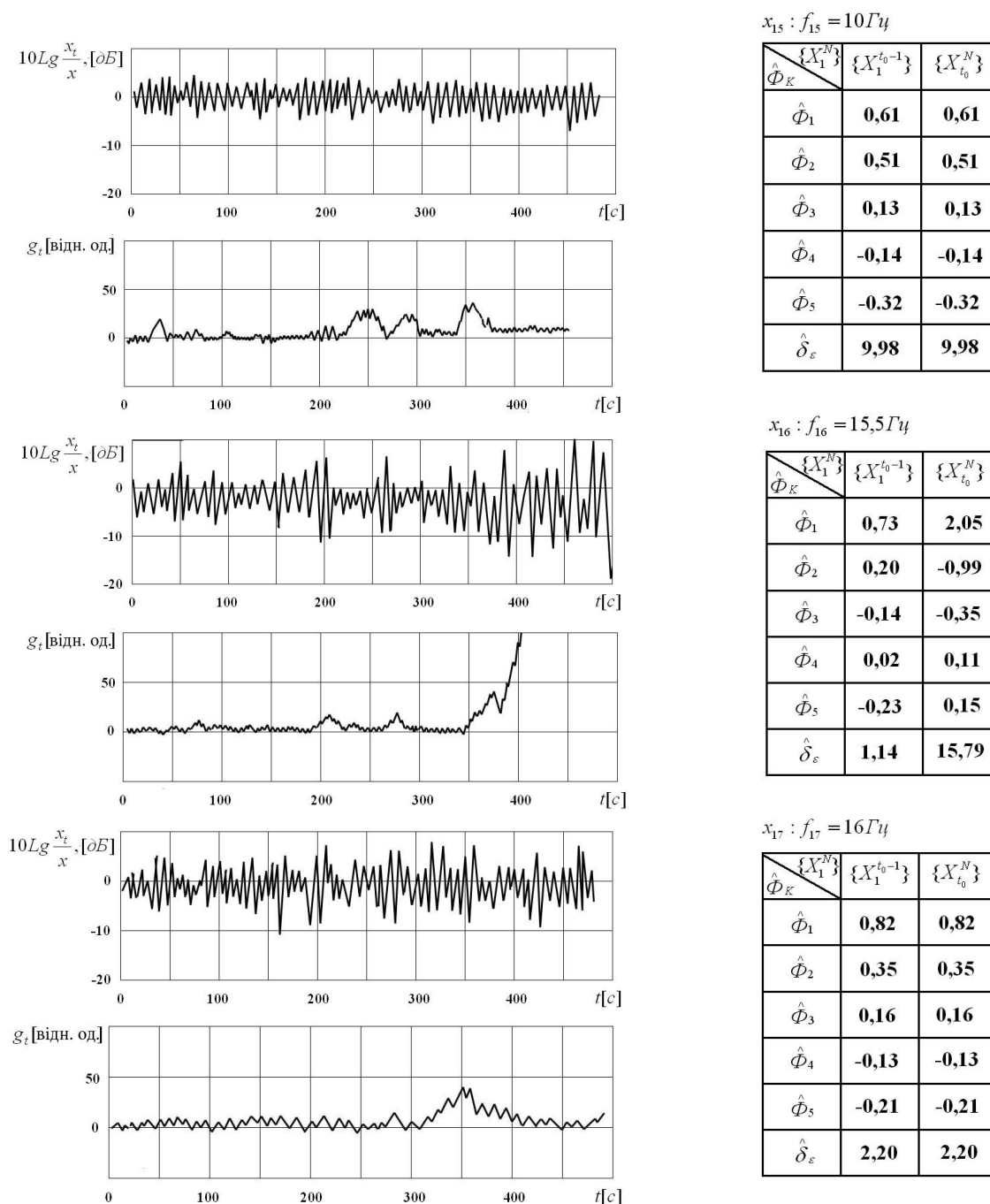


Рис. 4. Схема функціонування алгоритму визначення моменту міжкласового переходу за умови апіорної невизначеності класів відповідно до даних [7]

ні твела та вищезазначених характерних властивостей нейтронного шуму як діагностичного сигналу. Автоматичне визначення межі між класами A1 та A2, а також подальше виокремлення класу A3 дало змогу сформувати відповідні навчальні вибірки та сформувати центри кластерів цих класів на основі запропонованого в [7] підходу. У результаті ця діагностична модель дає змогу ефективно використати

нейрокомп'ютерний діагностичний підхід для забезпечення автоматичної діагностики попередньо невідомих експерту фізичних класів для запропонованої модифікованої штучної нейронної мережі діагностичного призначення з топологією Кохонена.

На рис. 5 представлено узагальнену структурну схему функціонування розробленої в цій роботі нейрокомп'ютерної системи для комп'ютерної реалізації

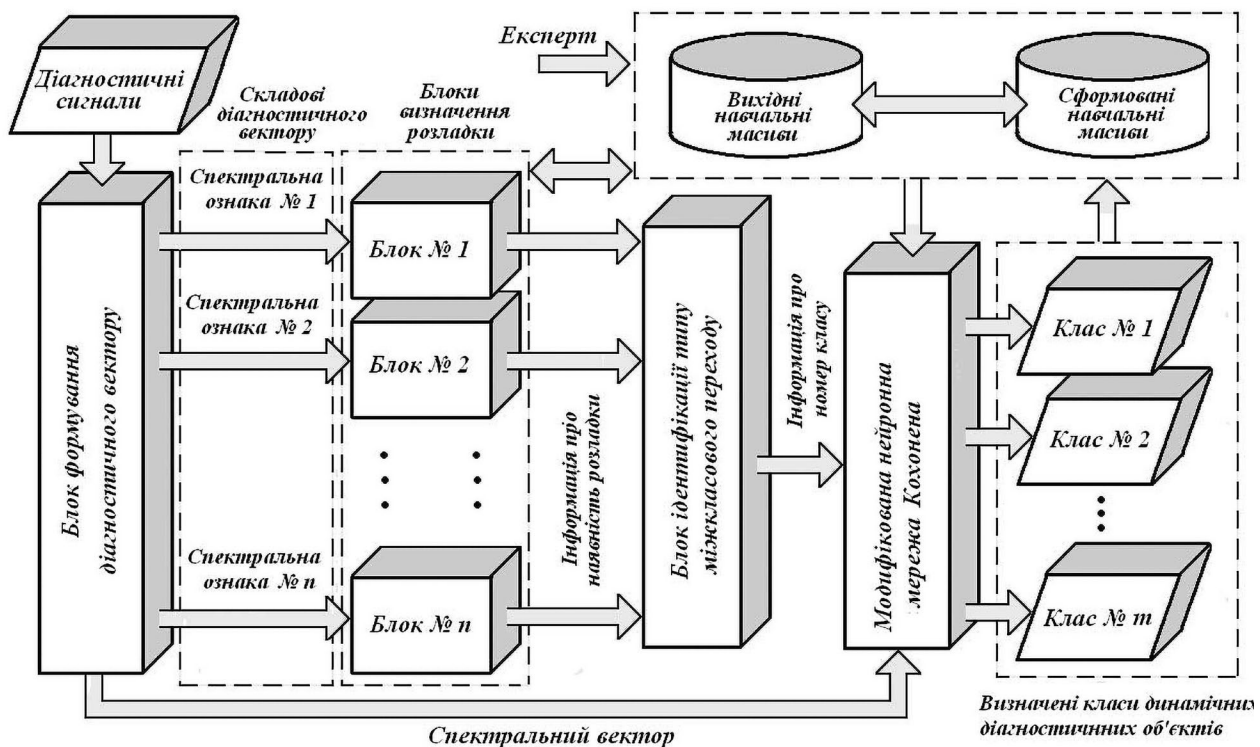


Рис. 5. Узагальнена структурна схема функціонування нейрокомп'ютерного комплексу для оперативного пошуку можливих корозійних пошкоджень за даними [7]

оперативного пошуку корозійних пошкоджень ТВЗ реактора типу ВВЕР за параметрами нейтронного шуму. Відповідно до цієї схеми діагностичний сигнал, що підлягає ідентифікації, надходить до блоку спектрального аналізу, в якому на основі відповідного типу спектрального перетворення (зокрема алгоритму швидкого перетворення Фур'є) формуються спектральні ознаки цього сигналу. На основі інформації, попередньо наданої експертом, з множини цих спектральних ознак виокремлюються певні діапазони сигналу, зміна статистичних властивостей в яких відповідає за факт міжкласового переходу. У кожному з таких блоків виявлення факту розладки реалізується на основі вищерозглянутого алгоритму визначення моменту зміни статистичних властивостей відповідного часового ряду.

Інформація про визначені таким чином спектральні канали, які характеризують початок відповідного міжкласового переходу, на основі логічного аналізу узагальнюється в блоці ідентифікації типу міжкласового переходу, на виході якого формується номер класу, що попередньо був невідомим. Синхронно з визначенням типу цього класу з блоку спектрального аналізу на вхід до модифікованої штучної нейронної мережі Кохонена [7] надається відповідна

цьому типу класу спектральна реалізація. За відсутності реалізацій цього типу в карті самоорганізації, відповідно до запропонованого в цій роботі алгоритму самоорганізації, здійснюється автоматичне динамічне додавання нового класу до множини класів діагностичних об'єктів А, що підлягають розпізнаванню. Усі ідентифіковані таким чином (раніше невідомі) типи класів діагностичних об'єктів та відповідні цим класам спектральні реалізації реєструються в базі даних системи автоматичної діагностики та надаються експерту для подальшого аналізу.

Практична перевірка запропонованого в цій роботі алгоритму адаптивної діагностики корозійних пошкоджень в АкЗ реакторів типу ВВЕР за параметрами нейтронного шуму, що реєструється на виходах електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів, дає змогу зробити наведені нижче висновки.

1. Реалізований у цій роботі алгоритм автоматичного аналізу випадкових часових рядів, що утворені рівнями спектральної повноти в інформаційно значущих частотних діапазонах спектрів діагностичних сигналів, які надходять з виходів штатної системи СВРК на вхід запропонованої системи автоматичної діагностики нейромережевого типу, дає змогу надійно розпізнавати початок генерації парової фази

та розвиненого пазиркового кипіння на поверхні твела, яке могло виникнути в результаті корозійних пошкоджень цирконієвої оболонки.

2. Вирішення завдання адаптації програмно реалізованої діагностичної нейромережевої структури в умовах апіорної невизначеності класів випадкових об'єктів, що підлягають розпізнаванню, може бути ефективно реалізоване на основі виявлення моменту статистичної розладки випадкового часового ряду з використанням його авторегресійної математичної моделі.

Висновки

1. Обґрунтовано фізичний взаємозв'язок, що існує між процесом початку кипіння теплоносія в реакторі типу ВВЕР та розвитком аварійного зростання температури поверхонь твелів у результаті корозійного ураження цих поверхонь.

2. Показана можливість використання нейтронних діагностичних сигналів системи СВРК для раннього автоматичного виявлення початку кипіння теплоносія в АкЗ реактора типу ВВЕР.

3. Запропоновано та реалізовано алгоритми автоматичного розпізнавання сигналів нейтронного шуму в АкЗ реактора типу ВВЕР в умовах активації перших центрів пароутворення на поверхнях твелів.

4. Практично реалізовано підхід до використання кінцевої множини спектральних складових нейтронного шуму, що реєструються на виходах електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів системи СВРК в АкЗ реактора типу ВВЕР, для оперативної діагностики нерегламентного режиму початку кипіння теплоносія на поверхнях твелів цього реактора.

5. Запропоновано структуру комп'ютерного комплексу для автоматичного виявлення початку кипіння теплоносія, зокрема внаслідок корозійних пошкоджень поверхонь твелів в АкЗ реакторів типу ВВЕР.

Список використаної літератури

1. Шаповалова С. І. Комп'ютерне моделювання карти самоорганізації для розв'язання задачі розпізнавання сигналів / С. І. Шаповалова, Г. І. Шараєвський // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2007. – № 574. – С. 75–81.
2. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении / В. И. Толубинский. – Киев : Наукова думка, 1980. – 315 с.

3. Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок / А. В. Носовский, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2017. – 624 с.
4. Теплофизика безопасности атомных электростанций / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 484 с.
5. Несис Е. И. Кипение жидкостей / Е. И. Несис. – Москва : Наука, 1973. – 280 с.
6. Андреева А. Б. Очаговая коррозия циркониевых сплавов. Факторы и механизмы. Обзор / А. Б. Андреева, Г. И. Маершина, Г. П. Кобылянский. – Москва : ЦНИИатоминформ, 1989. – 42 с.
7. Шараєвський Г. І. Нейромережеві програмні засоби для автоматичної діагностики елементів обладнання атомних електростанцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Г. І. Шараєвський. – Київ : ПІМЕ НАН України, 2011. – 24 с.
8. Аппаратно-программный комплекс для шумовой диагностики реакторов ВВЭР. Техническое описание. – Москва : РЦН «Курчатовский институт», 1992. – 235 с.

G. I. Sharaievskyi

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Methodology for Operational Diagnosis of Corrosion Damage to Cladding of Fuel Rod in VVER Reactors Based on Artificial Neural Network

This work examines the practical implementation of the author's theoretical approach to solving the problem of early detection of pre-accident thermal state of the fuel rod cladding in a light water reactor with critical thermodynamic parameters of the coolant. The goal is to automatically detect the initial stages of vapor phase generation on the surface of the heat exchanger. The physical principle of the proposed diagnostic model involves timely, non-contact recognition of the activation regime of the first centers of vapor formation based on computer identification of spectral signatures of diagnostic signals of this abnormal thermal state of the fuel rod surface. The computer implementation of this preventive diagnostic approach involves the use of computational algorithms to ensure automatic recognition of neutron noise signals in the reactor core of a nuclear power reactor of the VVER type in a multi-dimensional space of spectral features.

As indicators of thermohydraulic regimes subject to automatic recognition, the work proposes using a set of spectral components of noise diagnostic signals recorded at the outputs of measurement sensors, primarily electron-emission neutron flow detectors.

The work demonstrates the possibility of using neutron diagnostic signals and their spectral signatures in computational procedures that ensure automatic recognition of non-regulated thermal contact regimes with the fuel rod surface. Practical verification of the developed mathematical support and the created software complex for automatic identification of non-regulated thermohydraulic regimes in the area of critical thermodynamic parameters of light water coolant has been carried out. The possibility of preventive detection of an emergency heat transfer crisis by the parameters of neutron noise in the heat-releasing assembly of fuel rod has been demonstrated.

Keywords: preventive diagnostics, corrosion damage, start of boiling coolant, neutron noise spectra, spectral signature recognition, automatic recognition of diagnostic signals, artificial neural network, Kohonen topology.

References

1. Shapovalova S. I., Sharayevskyi G. I. (2007). [Computer modeling of a self-organization map for solving the problem of signal recognition]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Automation, Measurement and Control*, vol. 574, pp. 75–81. (in Ukr.)
2. Tolubinsky V. I. (1980). *Teploobmen pri kypenii* [Heat transfer during boiling]. Kyiv: Naukova Dumka, 315 p. (in Rus.)
3. Nosovskyi A. V., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2017). *Teplofizika resursa jadernykh energoustanovok* [Thermal physics of NPP resource]. ISP NPP, NAS of Ukraine, 624 p. (in Rus.)
4. Kliuchnikov A. A., Sharaevskyi I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskyi G. I. (2010). *Teplofizika bezopasnosti atomnykh elektrostancii* [Thermophysics of NPP safety]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 484 p. (in Rus.)
5. Nesis E. I. (1973). *Kipeniye zhidkostey* [Boiling of Liquids]. Moscow: Nauka, 280 p. (in Rus.)
6. Andreeva A. B., Maershina G. I., Kobylinsky G. P. (1989). *Ochagovaya korroziya tsirkoniyevykh splavov. Faktory i mekhanizmy. Obzor* [Localized corrosion of zirconium alloys. Factors and mechanisms. Review]. Moscow: TsNII-Atominform, 42 p. (in Rus.)
7. Sharaevsky G. I. (2011). *[Neural network software for automatic diagnostics of nuclear power plant equipment elements]* (PhD Thesis). Kyiv: G. E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, NAS of Ukraine, 24 p. (in Ukr.)
8. *Hardware and software complex for noise diagnostics of VVER reactors*. Technical description. Moscow: National Research Centre "Kurchatov Institute", 1992, 235 p. (in Rus.)

Надійшла / Received 27.01.2025

Рекомендована до друку / Accepted 12.06.2025