

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

ГОРАНЧУК ВАДИМ ВІКТОРОВИЧ

УДК 621.039.58

**МОНІТОРИНГ АКТИВНОЇ ЗОНИ ВВЕР-1000
МЕТОДАМИ НЕЙТРОННО-ШУМОВОЇ ДІАГНОСТИКИ**

05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем безпеки атомних електростанцій (ІПБ АЕС) Національної академії наук України (НАН України).

Науковий керівник: доктор технічних наук,
Борисенко Володимир Іванович
завідувач відділення атомної енергетики
Інституту проблем безпеки атомних
електростанцій НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
Каденко Ігор Миколайович
завідувач кафедри ядерної фізики фізичного
факультету Київського національного
університету імені Тараса Шевченка
МОН України

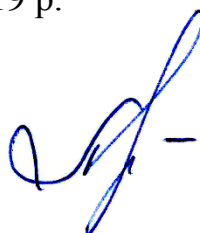
доктор технічних наук, доцент,
Маслов Олег Вікторович
завідувач кафедри фізики Навчально-наукового
інституту комп'ютерних систем Одеського
національного політехнічного університету
МОН України

Захист відбудеться «13» травня 2019 р. о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 27.201.01 Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Лисогірська, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Лисогірська, 12.

Автореферат розісланий « ____ » квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 27.201.01,
к.т.н., с.н.с.



О.А. Кучмагра

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наразі перші введені в експлуатацію атомні електростанції (АЕС) з реакторами типу ВВЕР-1000 працюють вже понад 35 років, при цьому генеральним конструктором такої реакторної установки (РУ) був визначений проектний ресурс експлуатації у 30 років. Усе це дає підстави для подальшої експлуатації таких РУ лише за умови обґрунтування їх безпечної експлуатації у понадпроектні строки. У питанні подовження строків експлуатації ядерних енергоблоків надзвичайно важливим є завдання розробки та впровадження сучасних систем діагностики та моніторингу, серед яких особливе місце посідають системи, розроблені на основі методів нейтронно-шумової діагностики. Також більш високі вимоги встановлюють до надійності контролю за поточним станом обладнання у зв'язку з майбутньою роботою енергоблоків у маневрових режимах.

З огляду на необхідність запобігання появи неконтрольованих вібрацій обладнання АЕС задля безпечної експлуатації останніх, особливу увагу приділяють моніторингу вібрацій обладнання РУ як на стадії проектування та стендового відпрацювання елементів обладнання, так і в період пусконаладжувальних робіт, а згодом – і протягом експлуатації ядерних енергоблоків.

Як у вітчизняній, так і в закордонній практиці в атомно-енергетичній галузі значну частку відмов ядерного палива, особливо на стадії впровадження нових типів тепловидільних збірок (ТВЗ), становлять відмови, зумовлені вібрацією ТВЗ. Застосування систем віброшумової діагностики (СВШД) значно розширює можливості моніторингу об'єкта (наприклад, ТВЗ) і може бути основою для виконання оцінки вібраційного ресурсу обладнання, зокрема і з подовженим строком експлуатації.

Ще одним важливим аспектом актуальності впровадження СВШД є застосування на енергоблоках АЕС нових поколінь ТВЗ, у тому числі, й альтернативних виробників.

Досвід провідних експертів в галузі шумового моніторингу і діагностики (включаючи Аркадова Г.В., Павелка В.І., Усанова А.І.) вказує на те, що навіть для реакторів одного типу шумові моделі потребують індивідуального підходу, дослідження і налаштування, оскільки завжди існують малі конструктивні розбіжності у проектах РУ навіть одного типу.

Також потрібно брати до уваги особливості монтажу та різний технічний стан конструкцій. Все це призводить до відмінностей спектральних характеристик вібрацій обладнання РУ і потребує проведення нових окремих досліджень та вирішення наукових завдань, пов'язаних із впровадженням систем діагностики на кожній конкретній РУ. Без сумніву, адаптація моделей, що були створені для інших типів реакторів (PWR, BWR), є ще більш складним і неявним завданням, оскільки кількість відмінностей в обладнанні та характеристиках процесів є ще більшою.

Підсумовуючи зазначене вище, можна говорити про існування актуального науково-технічного завдання забезпечення експлуатації АЕС при

подовженні експлуатації у понадпроектний строк шляхом впровадження сучасних систем моніторингу і віброшумової діагностики активної зони реактора типу ВВЕР-1000.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні наукові дослідження дисертації виконано в ІПБ АЕС НАН України у рамках проведення науково-дослідних робіт (НДР): № РК 0108U000726 «Розробка методів та засобів контролю підкритичності активної зони реактора», (2008–2011 рр.); № РК 0112U004544 «Розробка методів та засобів контролю коефіцієнтів реактивності ядерного реактора» (2012–2016 рр.).

Мета і завдання дослідження. *Метою* роботи є підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом впровадження моніторингу за процесами в активній зоні реактору типу ВВЕР-1000, а також залучення до експлуатаційної практики сучасних методів нейтронно-шумової діагностики.

Завдання наукового дослідження. Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи було сформульовано та вирішено приведенні нижче завдання наукового дослідження.

1. Аналіз та систематизація методів нейтронно-шумової діагностики, вибір серед них найбільш інформативних для застосування в системах діагностики реакторів типу ВВЕР-1000.

2. Розробка методів та програмного забезпечення (ПЗ) для аналізу шумів від нейтронних детекторів реактора, а також верифікація і валідація розробленого ПЗ.

3. Проведення аналізу шумової складової сигналів детекторів прямого заряду (ДПЗ) та іонізаційних камер (ІК), а також аналіз їх зміни протягом паливної кампанії.

4. Розробка моделей діагностування вібростану внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) і ТВЗ.

5. Визначення локальної чутливості ДПЗ та оцінка впливу на сигнал детектора від нейтронів, згенерованих в ТВЗ, у тому числі – і в суміжних ТВЗ.

6. Дослідження можливості відновлення сигналів ДПЗ, що вийшли з ладу під час паливної кампанії реактора.

Об'єкт дослідження: нейтронно-фізичні, теплогідрравлічні та вібраційні процеси в активній зоні реактора типу ВВЕР-1000.

Предмет дослідження: моделі, методи та засоби визначення параметрів активної зони, у тому числі – вібраційного стану ВКП і ТВЗ реактора типу ВВЕР-1000.

Методи дослідження:

- кореляційні та спектральні – для дослідження сигналів від ДПЗ та ІК;
- об'єктно-орієнтоване програмування;
- моделювання на основі штучних нейронних мереж – для прогнозування струмів у ДПЗ.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вдосконалено моделі оцінки часу запізнення проходження флуктуації параметрів теплоносія вздовж ТВЗ, які були побудовані на основі сигналів нейтронних детекторів, що забезпечило можливість моніторингу за швидкістю теплоносія в активній зоні реактора в умовах значного глобального нейтронного шуму, при цьому такі методи оцінки часу запізнення, як узагальнені взаємкореляційні функції, було використано нами вперше для аналізу саме нейтронних шумів;

– вперше досліджено ознаки вібрацій ВКП і ТВЗ реактору типу ВВЕР-1000 на основі даних від 64 каналів нейтронних вимірювань (КНВ) та з частотою дискретизації 436 Гц, виявлено гармоніки «биття» елементів конструкції ТВЗ на частотах кратних ~ 5 Гц у спектрах ДПЗ ЗАЕС-1;

– вперше визначено та обґрунтовано уставки формування захистів і блокувань за визначеними ознаками, а саме – спрацювання попереджувального та аварійного повідомлення, відповідно, у наступних випадках: збільшення середньоквадратичного відхилення нейтронного потоку в 5 та 10 разів; зміна положення піків характерних частот на 0,3 та 0,5 Гц; збільшення амплітуди піків характерних частот відносно еталонного стану на 30 % та 50 %;

– вперше реалізовано алгоритм відновлення сигналів ДПЗ із застосуванням нейронних мереж з похибкою не більше 2 % за умови навчання нейронної мережі на широкому діапазоні даних, що уможливорює визначення струму ДПЗ, який вийшов з ладу.

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів забезпечується коректною постановкою задач дослідження, вибором апробованих методів дослідження, застосуванням сучасних засобів вимірювання, використанням математичних методів та сучасної обчислювальної техніки.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблені розрахункові програми віброшумової діагностики впроваджено в системах внутрішньореакторної шумової діагностики (СВРШД), що постачаються на АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000 в складі комплексної системи діагностики (КСД);

– проведений аналіз сигналів ДПЗ дозволяє виявляти аномалії в вібраціях ВКП і ТВЗ.

Практичне використання результатів дисертації підтверджено актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи було отримано автором самостійно. Автор брав безпосередню участь у проведенні наукового дослідження на всіх етапах, а саме:

- формулюванні мети і постановці завдань наукового дослідження;
- розробці моделей для задач нейтронно-шумового моніторингу та діагностики;

- обґрунтуванні значень уставок формування захистів і блокувань у СВРШД за спектральними характеристиками;
- проведенні аналізу архітектур та методів навчання нейронних мереж, а також їх побудові;
- розробці розрахункової моделі РУ типу ВВЕР-1000 для дослідження перехідних режимів роботи;
- розробці розрахункового ПЗ та виконанні самих розрахунків;
- проведенні аналізу отриманих експериментальних і розрахункових результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях:

- Третья международная научно-практическая конференция "Повышение безопасности и эффективности атомной энергетики", 24–28 сентября 2012. – Одесса;
- XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 1–5 лютого 2016. – Київ;
- V Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики», 5–9 вересня 2016. – Одеса;
- XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 10–13 квітня 2017. – Київ;
- XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, 16–20 квітня 2018. – Київ;
- VI Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики», 4–6 вересня 2018. – Одеса.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 9 статей – у провідних фахових виданнях (4 з яких входять до бази цитування SCOPUS) та 5 – у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Робота викладена на 190 сторінках, містить 76 рисунка, 11 таблиць і список використаних джерел, що включає 153 найменування на 15 сторінках, та Додатки (8 сторінок).

ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації. Визначено предмет та об'єкт дослідження, а відповідно до них – мету і завдання дослідження. Перераховано використані наукові методи дослідження та змістовно відзначено, що саме досліджувалось із використанням кожного з методів. Також у Вступі представлено: наукову новизну отриманих результатів, особистий внесок здобувача, результати апробації матеріалів дисертаційної роботи, зв'язок її з НДР, а також структуру та обсяг дисертації. Надано відомості щодо практичного використання результатів досліджень.

У **першому розділі** висвітлено стан проблеми та виконано постановку завдань дослідження. Відзначено, що під час експлуатації РУ важливо забезпечити проектний режим її роботи і завчасно виявляти аномалії, що можуть вплинути на працездатність РУ.

Визначено задачі, що можуть бути вирішеними методами нейтронно-шумової діагностики, а саме: моніторинг швидкості теплоносія в активній зоні, вібростану ВКП і ТВЗ, температурного коефіцієнта реактивності (ТКР).

Віброшумова діагностика дозволяє визначати вібростан обладнання на основі аналізу зміни частотних характеристик як у міжремонтний період, так і протягом життєвого циклу РУ. СВШД може використовувати сукупність проектних та додаткових датчиків переміщень, встановлених на корпусі реактора, датчиків пульсацій тиску теплоносія і детекторів: внутрішньозонного нейтронного потоку системи внутрішньореакторного контролю (СВРК) і позазонного нейтронного потоку апаратури контролю нейтронного потоку (АКНП).

Автором відзначено складність задачі інтерпретації спектральних віброхарактеристик. Спектральна оцінка будь-якого сигналу системи віброконтролю містить до декількох десятків резонансних особливостей, у свою чергу кожна з яких, взагалі кажучи, несе інформацію про поточний технічний стан того чи іншого елемента РУ. Резонансні процеси можна охарактеризувати як їх місцеположенням на осі частот, так і значенням амплітуди. Для даних параметрів необхідно визначити діагностичні пороги й алгоритми, що пов'язують перевищення порогів.

Відзначено, що оцінка вібростанів саме ВКП і ТВЗ є найбільш важливою поміж іншого обладнання АЕС у зв'язку з потенціальною небезпекою виходу радіоактивності у теплоносій першого контуру. У той же час така оцінка є і найбільш складним завданням.

Розглянуто історію досліджень нейтронних шумів на різних АЕС, впровадження відповідних систем моніторингу та діагностики на закордонних енергоблоках, а також на АЕС України, у виконанні яких автор дисертації брав безпосередню участь.

У **другому розділі** представлено результати аналізу та систематизацію методів нейтронно-шумової діагностики, виконано вибір найбільш інформативних з них для застосування в системах моніторингу та діагностики реактору типу ВВЕР-1000. Виконано розробку алгоритмів та ПЗ

для аналізу шумів від нейтронних детекторів реактора, представлено результати верифікації розробленого ПЗ.

Автором також проведено кореляційні та спектральні аналізи. Для отримання частотних характеристик сигналу детектора нейтронів використовується швидке перетворення Фур'є, що може вважатися базовою функцією, та з якої отримуються всі інші характеристики, а саме: авто- та взаємоспектральна густини потужності (АСГП та ВСГП), когерентність, реосанс, імпульсна перехідна функція (ІПФ), фаза ВСГП.

Вібрації ТВЗ та ВКП проявляються у вигляді резонансів АСГП сигналів ДПЗ та ІК. АСГП сигналу x представляє собою перетворення Фур'є автокореляційної функції (АКФ):

$$P_{x,x}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{x,x}(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

де $K_{x,x}(t)$ – АКФ сигналу x . ВСГП сигналів x та y представляє собою перетворення Фур'є взаємокореляційної функції (ВКФ):

$$P_{x,y}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{x,y}(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2)$$

де $K_{x,y}(t)$ – ВКФ сигналів x та y .

Когерентність слугує ознакою рівня зв'язку досліджуваних процесів: чим ближче є величина когерентності до одиниці на певній частоті, тим більшою є збіжність гармонічних складових на цій частоті. Так, наприклад, ефект колективних вібрацій ТВЗ може проявлятися у вигляді резонансу функції когерентності двох ДПЗ, а функція когерентності сигналів ДПЗ та датчика абсолютних переміщень (ДАП) дозволяє виділити на корпусі реактора вібрації, що спричинені вібраціями ВКП.

Величина когерентності визначається наступним чином:

$$C(f) = \frac{P_{x,y}(f)}{\sqrt{P_{x,x}(f)P_{y,y}(f)}}, \quad (3)$$

де $P_{x,x}$ та $P_{x,y}$ визначено вище, а $P_{y,y}$ – АСГП сигналу y .

У пункті 2.2.4 розглянуто алгоритми оцінки часу запізнення одного випадкового процесу по відношенню до іншого. В даний час найбільш поширеним для оцінки часу запізнення є метод ВКФ, але він характеризується великими похибками, проте розглянуті спектральні методи дозволяють виділити інформацію щодо часу запізнення з високою точністю.

Оцінка часу запізнення може бути використана для моніторингу умовно поканальної швидкості теплоносія. Спектральні методи базуються на використанні реосансу, ІПФ, узагальненої взаємокореляційної функції з фазовим перетворенням (УВКФ-ФП), узагальненої взаємокореляційної функції максимальної правдоподібності (УВКФ-МП) та фази ВСГП.

Проблема полягає в оцінці параметра запізнення τ_0 за реалізаціями двох випадкових процесів $x(t)$, $y(t)$:

$$x(t) = l(t) + g(t) + n_1(t), \quad (4)$$

$$y(t) = l(t - \tau_0) + g(t) + n_2(t), \quad (5)$$

де $l(t)$ – локальний компонент, що несе інформацію про час затримки;

$g(t)$ – глобальний компонент, що є ідентичною складовою у сигналах двох ДПЗ;

$n_1(t)$ та $n_2(t)$ – інші шуми, якими, за певних умов, можна знехтувати.

Час запізнення сигналу – величина τ_0 – визначається з функцій реосансу, ПФ, УВКФ-ФП та УВКФ-МП як аргумент локального чи глобального максимуму.

Реосанс – це зворотне перетворення Фур'є комплексної когерентності:

$$R_{x,y}(t) = F^{-1}[C_{x,y}(f)]. \quad (6)$$

ПФ визначається як зворотне перетворення Фур'є відношення ВСГП до АСГП:

$$IMP_{x,y}(t) = F^{-1}\left[\frac{P_{x,y}(f)}{P_{x,x}(f)}\right]. \quad (7)$$

Із зазначених методів оцінки τ_0 в умовах реальних сигналів СВРШД найкращі результати було отримано при використанні фази ВСГП, що визначається наступним чином:

$$\varphi_{P_{x,y}}(f) = -\arctan \frac{\text{Im} P_{x,y}(f)}{\text{Re} P_{x,y}(f)} = -\arctan \frac{\sin 2\pi f \tau_0}{\cos 2\pi f \tau_0 + k(f)}, \quad (8)$$

де Im , Re – уявна та дійсна частини ВСГП, відповідно;

$k(f)$ – відношення АСГП глобального шуму до АСГП локального шуму.

Час запізнення визначається з нахилу фази ВСГП. За відсутності глобального шуму отримуємо:

$$\varphi_{P_{x,y}}(f) = -2\pi f \tau_0. \quad (9)$$

Всі алгоритми та ПЗ з розрахунку спектральних і кореляційних функцій пройшли процедури верифікації і валідації. Для прикладу далі буде показано процес верифікації алгоритму розрахунку квадрату когерентності. Для верифікації було змодельовано два сигнали:

- $x_1(t) = 0,7 \sin(2\pi 5t) + \sin(2\pi 12t) + 1,5 \sin(2\pi 17t) + 0,3 \sin(2\pi 21t) + 0,5 \sin(2\pi 25t)$;
- $x_2(t) = 0,7 \sin(2\pi 5t) + 0,3 \sin(2\pi 21t)$.

До обох сигналів додано характерну для сигналів ДПЗ шумову складову, а частоту дискретизації сигналів було обрано у 100 Гц. Результати розрахунку когерентності представлено на рис. 1, де видно, що когерентність на частотах 5 Гц та 21 Гц є близькою до одиниці, що свідчить про збіг гармонічних коливань на даних частотах. Отже, можна зробити висновок щодо коректності роботи алгоритму.

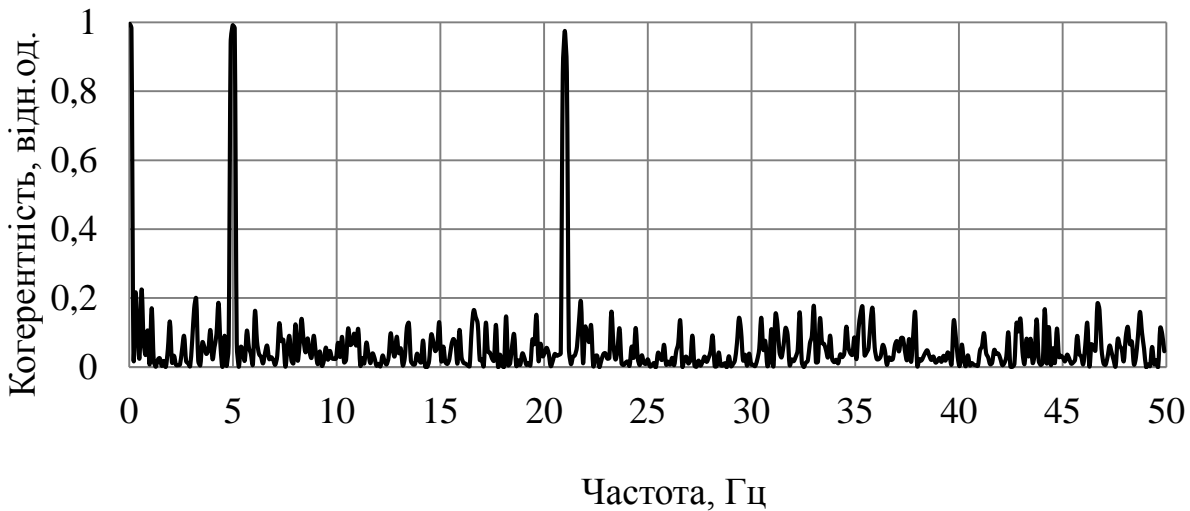


Рис. 1. Залежність когерентності від частоти

Для верифікації алгоритмів оцінки часу запізнення було згенеровано випадковий сигнал, що представляв з себе числа в діапазоні від 0 до 100, після чого було отримано другий сигнал, який представляв з себе перший сигнал, але зміщений на 50 відліків. До обох сигналів було додано шумову складову. Частота дискретизації сигналів склала 100 Гц. Отже, час запізнення між сигналами дорівнював 0,5 с. На рис. 2 представлено результати верифікації алгоритму ВКФ як без попередньої цифрової фільтрації сигналів, так і з фільтрацією (для видалення шумової складової).

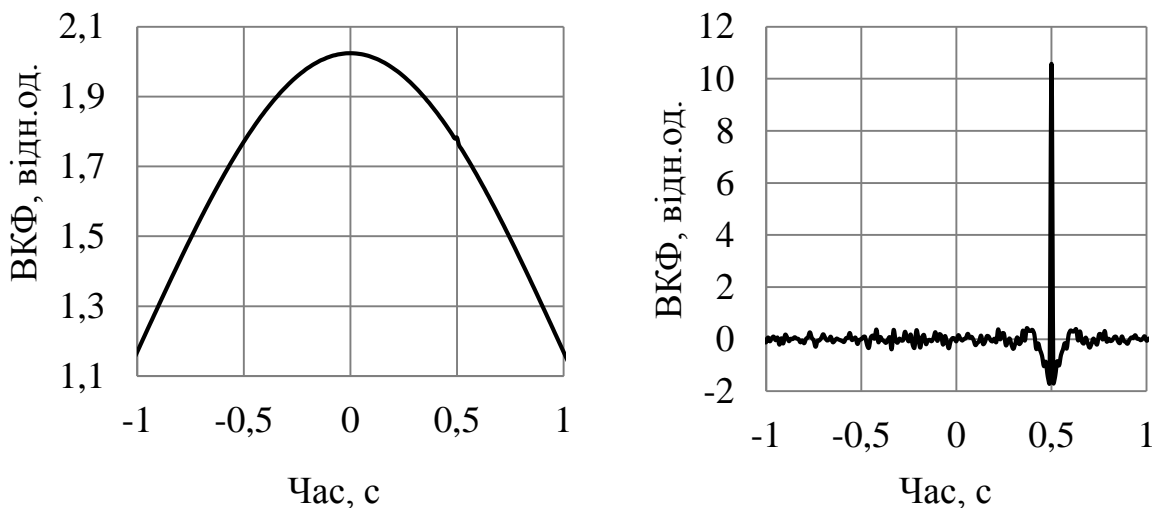


Рис. 2. ВКФ без фільтрації (зліва) та з фільтрацією (справа)

У **третьому розділі** представлено результати вирішення завдань шумового аналізу, зокрема – виконано оцінку часу запізнення проходження флуктуації параметрів теплоносія вздовж ТВЗ, досліджено вібростан ВКП і ТВЗ.

Процеси, що зумовлюють нейтронний шум, розглянуто в підрозділі 3.1. Шуми енергетичного ядерного реактора визначаються процесами нейтронної фізики, теплогідравліки, акустики, а також механічними вібраціями. Їх

інтерпретація дозволяє створювати інструмент ранньої діагностики стану РУ – шумову діагностику. Нейтронно-шумова діагностика базується на моніторингу флуктаційних складових детекторів нейтронного потоку.

В підрозділі 3.2 розглянуто задачу моніторингу за швидкістю теплоносія методами шумової діагностики. Важливим параметром, що впливає на вібростан ТВЗ, є саме швидкість теплоносія через активну зону (уздовж ТВЗ). Однак, в проекті РУ типу ВВЕР не вимірюються швидкість або витрата теплоносія через окрему ТВЗ. В основі шумового методу визначення швидкості теплоносія лежить визначення кореляції сигналів ДПЗ, що зумовлена проходженням по ТВЗ уздовж КНВ локальної флуктуації тиску, температури або іншої неоднорідності теплоносія. Швидкість при цьому визначається як відношення відстані між ДПЗ (для РУ типу ВВЕР-1000 крок розташування ДПЗ по висоті ТВЗ дорівнює 437,5 мм) до часу запізнення проходження флуктуації між цими ДПЗ.

Виконано оцінки часу запізнення сигналу ДПЗ, що розташовані в одному КНВ. На рис. 3 представлено фази ВСГП пар першого ДПЗ, КНВ № 23, блок № 1 ЮУАЕС.

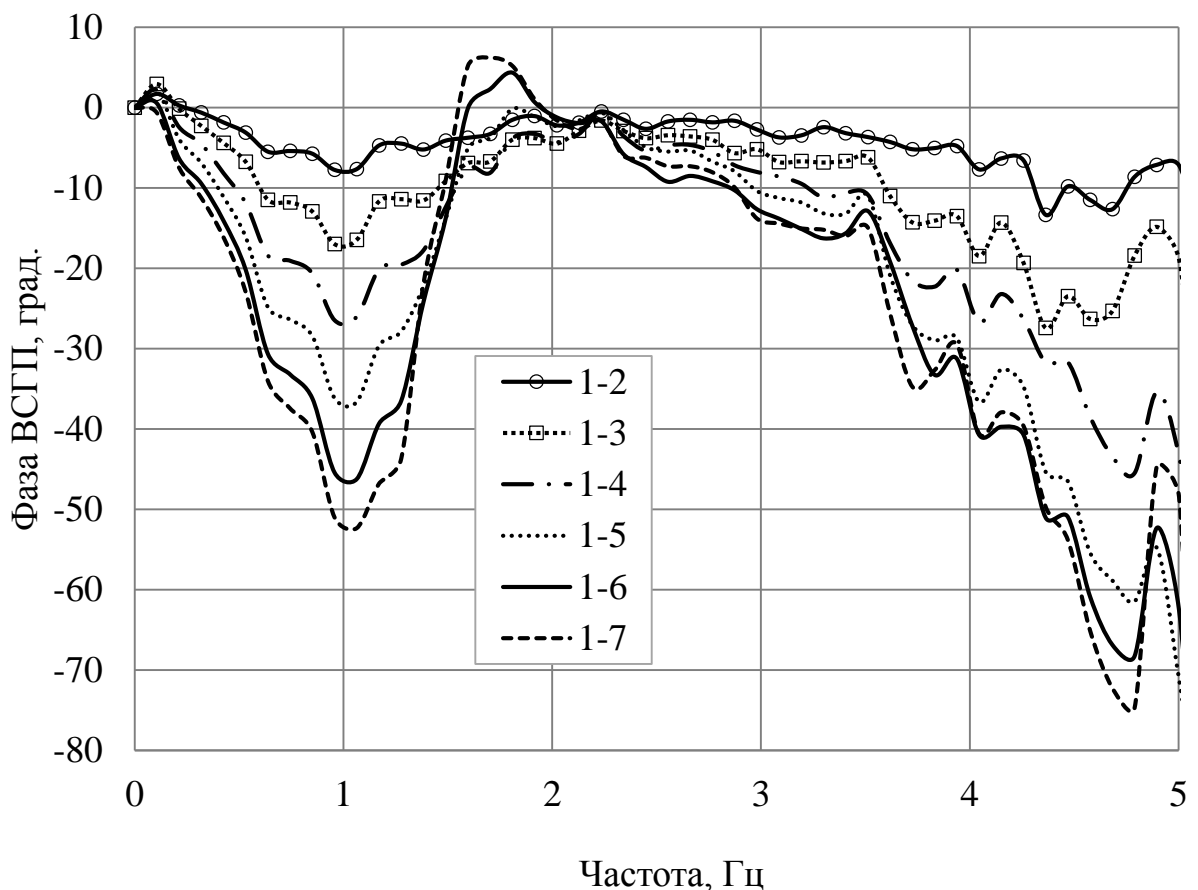


Рис. 3. Фази ВСГП ДПЗ КНВ № 23 блока № 1 ЮУАЕС; 30-та паливна кампанія, 2015 р. (пари ДПЗ 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6, 1–7)

З нахилу фаз ВСГП в діапазоні частот 0–1 Гц було отримано оцінки часу запізнення проходження флуктуації, результати представлено в табл. 1. Діапазон частот було обрано, базуючись на високому рівні когерентності сигналів в ньому, а також на підставі близькості фази до лінійної.

Оцінка часу запізнення за нахилом фази ВСГП

Група ДПЗ	Пара ДПЗ	Час, с
Між першим ДПЗ та рештою	1–2	0,026
	1–3	0,056
	1–4	0,083
	1–5	0,110
	1–6	0,135
	1–7	0,150

Показано, що результати оцінки часу запізнення між різними парами ДПЗ добре корелюють між собою. Відхилення оцінки часу запізнення за нахилом фази ВСГП пари периферійних ДПЗ від суми оцінок пар суміжних ДПЗ становить менше 5 %.

Встановлено, що метод ВКФ без фільтрації є непридатним для оцінки часу запізнення між сигналами ДПЗ. Метод ВКФ з попередньою фільтрацією сигналів дає відхилення від оцінки за фазою ВСГП близько 30 % для суміжних пар ДПЗ та 10 % для віддалених пар ДПЗ.

В підрозділі 3.3 досліджено вібростан ВКП і ТВЗ. Зміна струму нейтронного детектора при вібраціях ВКП і ТВЗ пов'язана зі зміною геометрії в системі «паливо-сповільнювач-детектор». Ефекти, що зумовлюють зміну струму, можуть реєструватися як поза-, так і внутрішньозонними нейтронними детекторами, за умови, що детектори не є віддаленими на значну відстань від місця прояву ефекту, що розглядається.

Контроль вібрацій шахти реактора може здійснюватися за сигналами позазонних нейтронних детекторів, оскільки флуктуації струму позазонного детектора нейтронів є пропорційними флуктуаціям товщини водяного зазору в опускній ділянці між шахтою та корпусом реактора.

Що стосується вібрацій ТВЗ, то багато в чому вони визначаються умовами фіксації головки і хвостовика ТВЗ. Так, коливання шахти реактора через нижню опорну плиту, в яку встановлено хвостовики ТВЗ, передаватимуться і на ТВЗ. Відповідно, значення амплітуди вібрацій ТВЗ у нижній частині буде більшим, ніж у верхній, а в разі недостатнього закріплення головки ТВЗ зі сторони блока захисних труб, значення амплітуди вібрацій головки ТВЗ буде більшим, ніж хвостовика ТВЗ. Також вібрації можуть виникати внаслідок втрати жорсткості пружинного блоку ТВЗ, зміщення дистанціонуючих решіток тощо.

Було виділено та підтверджено характерні частоти збурюючих сил, що впливають на вібростан ВКП і ТВЗ, а також основні власні частоти коливань ВКП і ТВЗ для реакторів типу ВВЕР-1000 (табл. 2).

Протягом двох паливних кампаній виконано аналіз зміни спектральних характеристик сигналів ДПЗ від 20 КНВ (по 7 ДПЗ у кожному КНВ) для ЮУАЕС-1 та від 64 КНВ для ЗАЕС-1. Уперше було проведено аналіз спектральних характеристик сигналів ДПЗ з частотою дискретизації 436 Гц (ЗАЕС-1). Для ЮУАЕС-1 частота дискретизації склала 109 Гц.

Характерні частоти реактору типу ВВЕР-1000

Частота, Гц	Характеристика
0,6	Резонанс компенсатора тиску
6,5	Перша петльова акустична стояча хвиля
9,2	Перша корпусна акустична стояча хвиля
13,2	Друга корпусна акустична стояча хвиля
16,6	Частота обертання ГЦН
2,3–2,7	Маятникова мода коливань шахти
4,7	Балкова мода коливань шахти
8,9–10,0	Балкова мода коливань шахти за проектних умов закріплення
2,1–3,2	Маятникові моди коливань ТВЗ
4,2–4,6	Перша балкова мода коливань ТВЗ за проектних умов закріплення

На рис. 4–7 представлено спектри сигналів ДПЗ та ІК для ЮУАЕС-1 та ЗАЕС-1.

На спектрах добре відрізняються резонанси, що характеризують основні частоти коливання шахти і ТВЗ (відповідно до табл. 3), аномальні вібрації не спостерігаються.

Показником чутливості вимірювального каналу СВРЩД є наявність у спектрі гармонік частоти обертання головного циркуляційного насоса (ГЦН) – 16,6 та 33,3 Гц. На рис. 7 представлено визначений у СВРЩД ЮУАЕС-1 спектр шумового сигналу однієї із трьох ІК, розташованих в серпентенітовому бетоні біологічного захисту реактора. Можна відзначити, що на спектрі шумового сигналу ІК добре відображено основні резонанси вібростану ВКП і ТВЗ. Отже, можна зробити висновок щодо придатності сигналів позазонних нейтронних детекторів для аналізу вібростану ВКП.

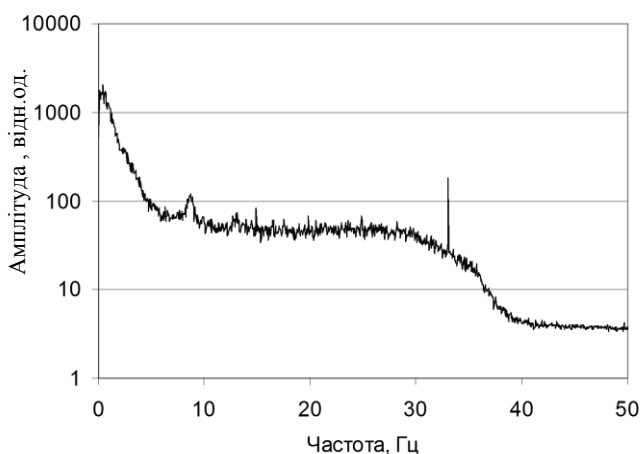


Рис. 4. Спектр сигналу ДПЗ № 1 (КНВ № 2, ТВЗ № 81) ЮУАЕС-1; 30-та паливна кампанія, 2015 р.

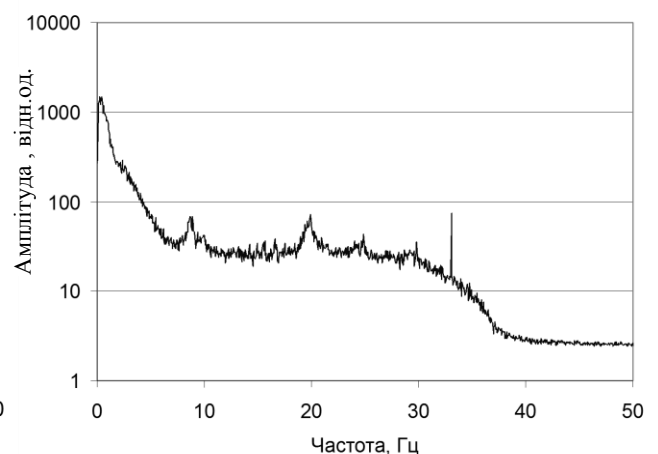


Рис. 5. Спектр сигналу ДПЗ № 4 (КНВ № 16, ТВЗ № 71) ЮУАЕС-1; 30-та паливна кампанія, 2015 р.

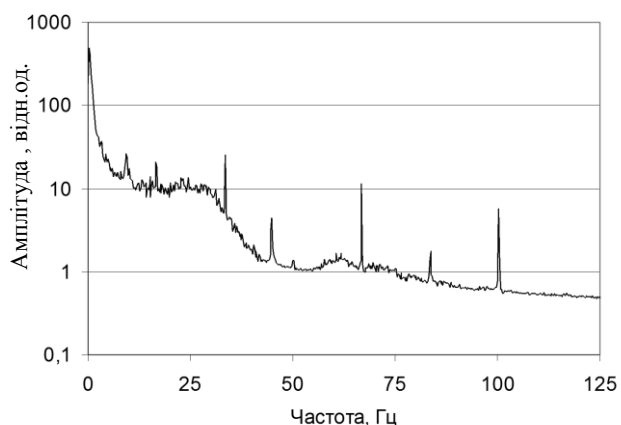


Рис. 6. Спектр сигналу ДПЗ № 7 (КНВ № 14, ТВЗ № 93) ЗАЕС-1; 27-ма паливна кампанія, 2015 р.

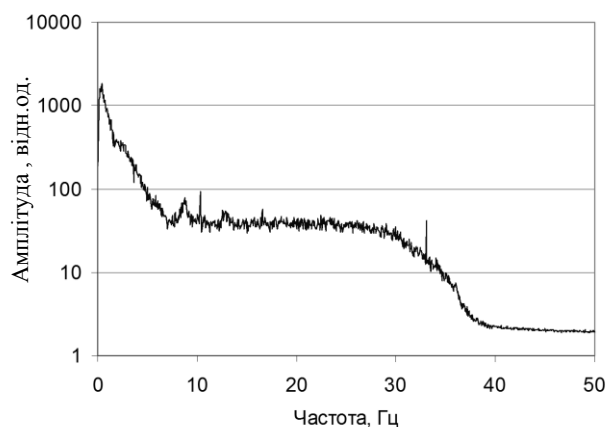


Рис. 7. Спектр сигналу ІК-3 (ЮУАЕС-1; 30-та паливна кампанія, 2015 р.

У результаті аналізу спектрів сигналів ДПЗ 27-ї паливної кампанії ЗАЕС-1 на деяких спектрах було виявлено резонанси на частотах, кратних ~ 5 Гц. Було встановлено, що вказані резонанси були зумовлені «биттям» елементів конструкції ТВЗ (рис. 8, 9).

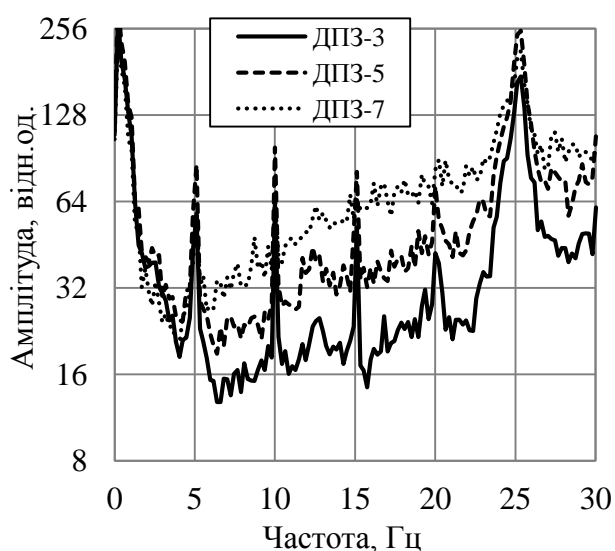


Рис. 8. Спектри сигналу ДПЗ № 3,5,7 (КНВ № 24, ТВЗ № 6) ЗАЕС-1; 27-ма паливна кампанія, 2015 р.

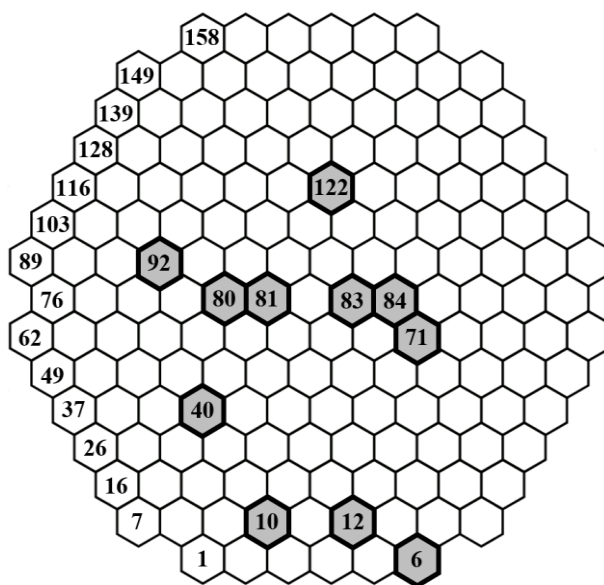


Рис. 9. Локалізація ТВЗ, для яких характерним є «биття»; ЗАЕС-1, 27-ма паливна кампанія, 2015 р.

Оскільки спектральні характеристики сигналів внаслідок нейтронних шумів змінюються протягом паливної кампанії, було виконано всебічний аналіз зміни спектральних та інших параметрів сигналів ДПЗ реактору типу ВВЕР-1000 (ВП ЮУАЕС, ВП ЗАЕС) протягом декількох паливних кампаній. Для наочного зображення на рис. 10 представлено зміну спектральних характеристик сигналу ДПЗ за декілька місяців.

Відповідно до аналізу зміни спектральних характеристик було запропоновано уставки формування захистів і блокувань за визначеними ознаками (підрозділ 3.4), а саме: спрацювання попереджувального та аварійного повідомлення, відповідно, у наступних випадках: збільшення

середньоквадратичного відхилення нейтронного потоку в 5 та 10 разів; зміна положення піків характерних частот на 0,3 та 0,5 Гц, збільшення амплітуди піків характерних частот відносно еталонного стану на 30 та 50 %.

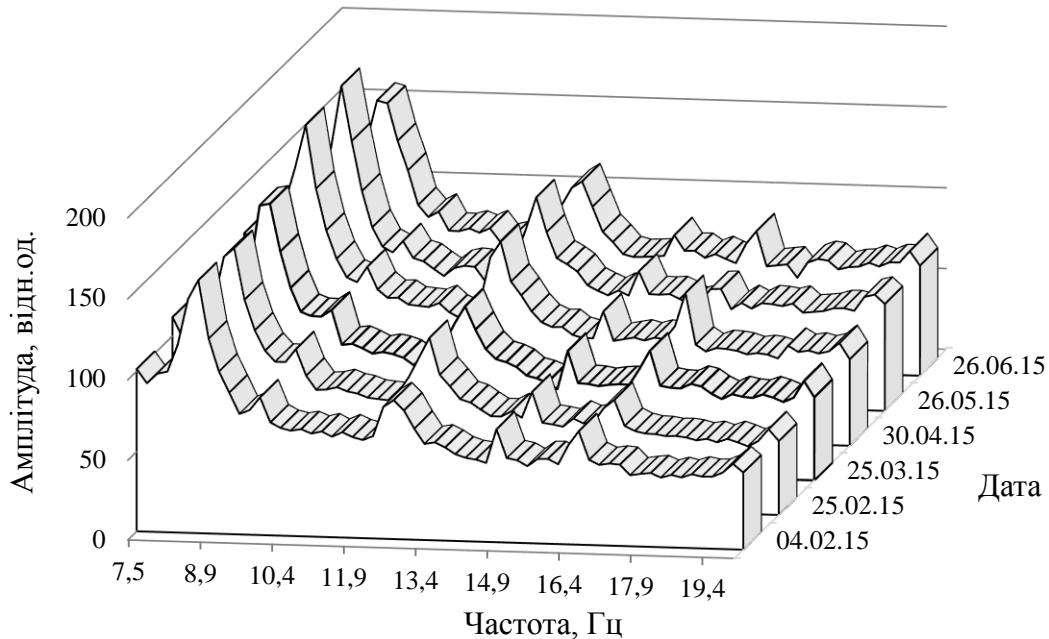


Рис. 10. Зміна спектру ДПЗ № 7 (КНВ № 57, ТВЗ № 114) ЮУАЕС-1; 30-та паливна кампанія, 2015 р.

Ще однією задачею, що може бути вирішеною із застосуванням нейтронно-шумових методів, є визначення ТКР (підрозділ 3.5). ТКР визначається як відношення зміни реактивності до малої зміни середньої температури теплоносія (в активній зоні), що викликала цю зміну реактивності:

$$TKP = \frac{\partial \rho}{\partial T_m^{ave}}, \quad (10)$$

де ρ – реактивність реактора;

T_m^{ave} – середня температура теплоносія в активній зоні реактора.

Традиційні методи вимірювання значень температурного коефіцієнта реактивності базуються на внесенні збурення в реактивність реактора і наступної її компенсації внаслідок зміни температури теплоносія в активній зоні.

Визначення ТКР шумовими методами передбачає застосування внутрішньозонного нейтронного детектора і термопари на виході з ТВЗ, що розташована над тією ж самою або суміжною збіркою. Шумові сигнали саме цих двох детекторів містять інформацію щодо ТКР, що може бути виділена для подальшого аналізу. Основною перевагою такого підходу є відсутність потреби внесення збурення реактивності в реактор для визначення ТКР.

У **четвертому розділі** вирішено задачу визначення просторової чутливості (локальності) ДПЗ, а саме: відстань, на якій сигнал ДПЗ є чутливим до вібраційних та інших процесів, що відбуваються в області розташування ДПЗ, тобто визначено розміри області, в якій процеси

моделюють сигнал ДПЗ. Завдяки цьому було визначено внесок твелів у сигнал ДПЗ відповідно до їх розташування відносно ДПЗ.

ДПЗ складається з емітера (нейтронно-чутлива частина) і колектора, між якими знаходиться ізолятор. Емітер ДПЗ реактору типу ВВЕР-1000 представляє собою відрізок родієвого дроту діаметром 0,5 мм і довжиною 250 мм.

Для опису фізичних процесів було розроблено модель ДПЗ у розрахунковому комп'ютерному коді MCNP. При моделюванні джерелом нейтронів було обрано ділянку ТВЗ 60° сектора симетрії висотою 1250 мм. Для визначення диференціального внеску в сигнал ДПЗ сектор ТВЗ, що моделюється, було умовно поділено за висотою на 5 зон по 250 мм кожна (при цьому розташування ДПЗ припадає на центральну зону).

Аналіз результатів моделювання показав, що внесок у сигнал ДПЗ від твелів суміжних ТВЗ становить ~25–30 %, в залежності від температури теплоносія та концентрації борної кислоти у теплоносії. Сумарний внесок до сигналу ДПЗ від твелів дальшої половини суміжної ТВЗ є меншим за ~4 %. Внесок у сигнал ДПЗ за висотою від центральної зони ТВЗ становить ~77 %, від двох зон, суміжних з центральною ~22 %, від двох периферійних зон ~1 %. Отримані результати дозволили встановити, що сигнал ДПЗ визначає вібростан саме тієї ТВЗ, в якій цей ДПЗ розташовано, і саме на висоті розташування зазначеного ДПЗ.

У **п'ятому розділі** досліджено можливість відновлення сигналів ДПЗ, що вийшли з ладу, із застосуванням технології нейронних мереж.

Однією з важливих задач сучасних систем внутрішньореакторного контролю є визначення параметрів питомого енерговиділення та величини підігріву теплоносія в межах активної зони реактора. Задача обґрунтування можливості надійного відновлення сигналів ДПЗ, що вийшли з ладу, є актуальною, оскільки кількість ТВЗ, для яких втрачено можливість контролю нейтронних характеристик, може бути критичною. Для вирішення даної задачі було використано технологію нейронних мереж.

Модель нейрону описується наступними рівняннями:

$$u_k = \sum_{j=1}^m \omega_{kj} x_j, \quad (11)$$

$$v_k = u_k + b_k, \quad (12)$$

$$y_k = \varphi(v_k), \quad (13)$$

де x_1, x_2, \dots, x_m – вхідні сигнали;

$\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{km}$ – синаптичні ваги нейрона k ;

u_k – лінійна вихідна комбінація вхідних сигналів;

b_k – зміщення;

v_k – потенціал активації;

$\varphi(v_k)$ – функція активації;

y_k – вихідний сигнал нейрона.

Нейронна мережа може бути описана на основі архітектури та синаптичних ваг. Було розглянуто мережі без прихованих шарів, з одним прихованим шаром та з двома прихованими шарами. З'єднання мережі йдуть від вхідного шару до першого з прихованих (якщо він є), потім до другого (якщо він є), потім – до вихідного. Для забезпечення потрібного взаємозв'язку нейронів змінюються за певним порядком синаптичні ваги нейронної мережі відповідно до алгоритму навчання.

При моделюванні на вхід нейронної мережі подавалися сигнали ДПЗ від 3–63 КНВ, джерелом вихідного сигналу слугував ДПЗ КНВ, що перевірявся. Навчання проводилося на перших п'яти наборах даних, а тестування – на наступних п'ятнадцяти. Часовий проміжок між наборами даних становив один тиждень. Моделювання було проведено для різних ДПЗ (як за роком використання, так і за місцем розташування у активній зоні), а також для різних енергоблоків та кампаній (26-та та 27-ма кампанії ЗАЕС-5, 27-ма та 28-ма кампанії ХАЕС-1, 11-та та 12-та кампанії ХАЕС-2).

Було досліджено вплив кількості вхідних сигналів (підрозділ 5.3.1), а також прихованих шарів (підрозділ 5.3.2) на похибку визначення вихідного сигналу. Проведено порівняння наступних алгоритмів навчання нейронних мереж: Левенберга-Марквардта та L-BFGS (підрозділ 5.3.3).

Вплив кількості вхідних сигналів розглянуто на прикладі 11-ї паливної кампанії ХАЕС-2 (табл. 3). У першому розрахунку на вхід подавалися сигнали ДПЗ від 63-х КНВ, у другому розрахунку – від 7 найближчих КНВ, в третьому – від 11 КНВ, що знаходилися в аналогічних місцях розташування вихідного КНВ у секторах симетрії 30°. У всіх розглянутих випадках вихідним сигналом слугував струм ДПЗ КНВ-57, ТВЗ-114 (рис. 11).

Таблиця 3

Відхилення розрахунку від фактичного значення для струмів ДПЗ КНВ-57, ХАЕС-2, 11-те паливне завантаження, в залежності від кількості вхідних КНВ

№	Кількість вхідних КНВ	Розташування вхідних КНВ в активній зоні	Максимальне відхилення, %
1	63	вся активна зона	6,52
2	7	поблизу вихідного КНВ	4,99
3	11	симетрично за сектором 30°	1,82

Аналізуючи табл. 3, можна стверджувати, що більша кількість вхідних сигналів нейронної мережі не обов'язково призводить до кращої оцінки вихідних сигналів. Доцільно обмежитися тільки тими вхідними сигналами, що найбільше визначають вихідний. Так, зменшення кількості вхідних КНВ з 63 до 7, що знаходяться поряд з вихідним КНВ, призвело до зменшення максимальної похибки на 1,53 %, а використання у якості вхідних сигналів КНВ, симетрично розташованих з вихідним КНВ в секторах симетрії 30°, призвело до зменшення максимальної похибки ще на 3,17 %. Даний ефект можна пояснити тим, що симетрично розташовані КНВ знаходяться в подібних фізичних умовах і потоки нейтронів у них добре корелюють.

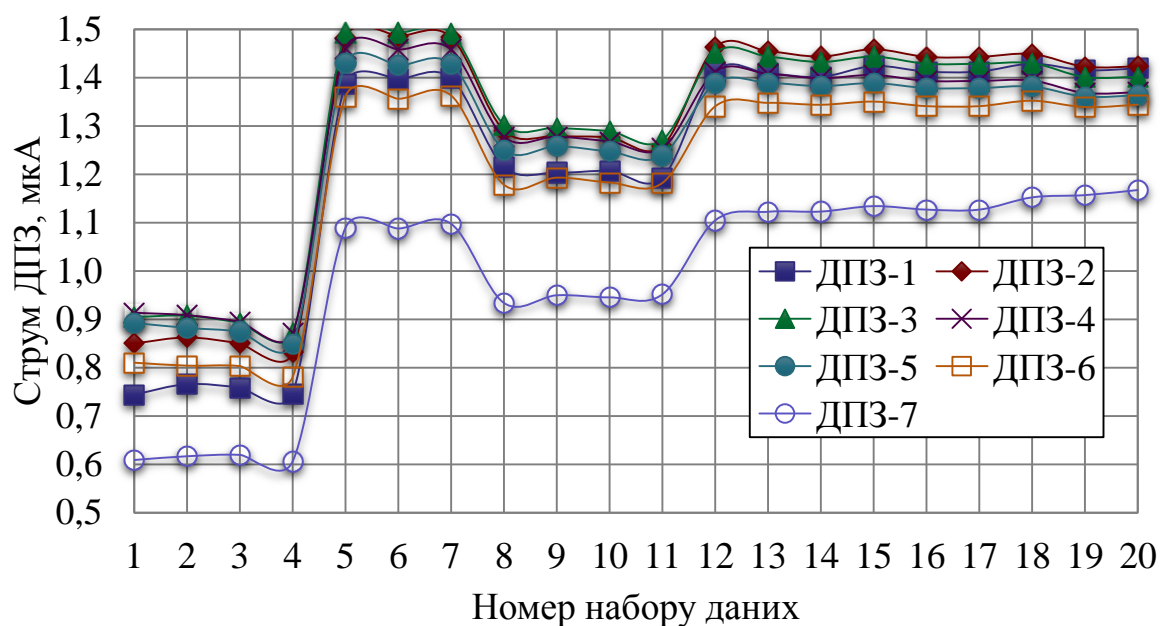


Рис. 11. Фактичне значення струмів ДПЗ КНВ-57 (ТВЗ-114) для 11-ї паливної кампанії ХАЕС-2

На рис. 12 представлена похибка відновлення струмів ДПЗ КНВ-57 з використанням нейронних мереж для позиції 3 табл. 3.

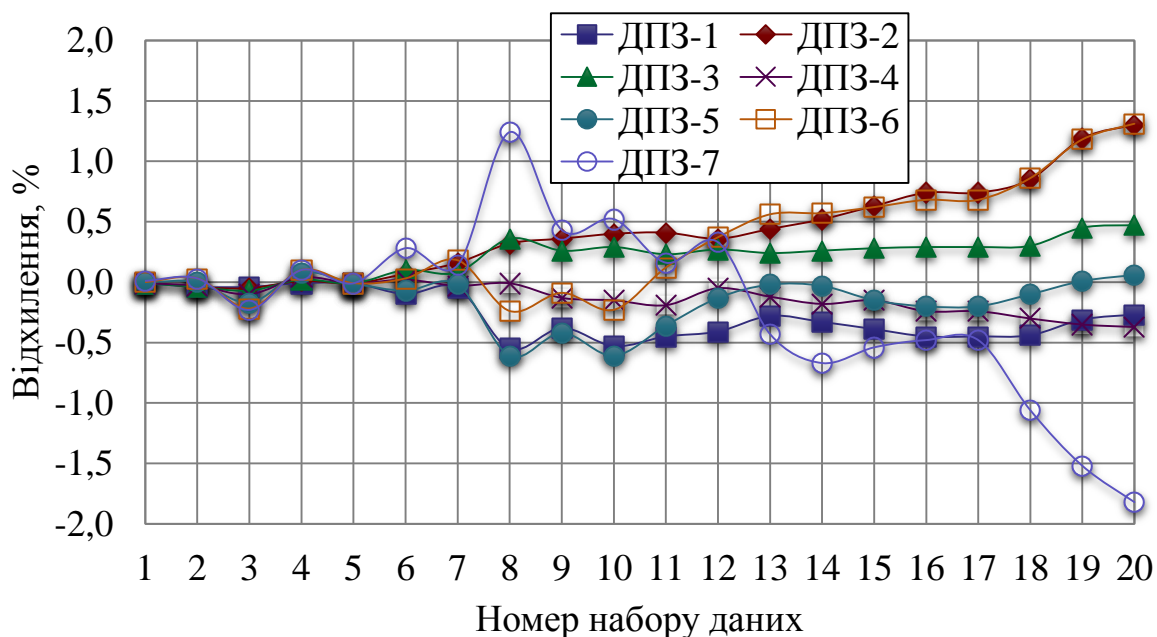


Рис. 12. Відхилення розрахункового струму ДПЗ КНВ-57 від фактичного для 11-ї паливної кампанії ХАЕС-2 (позиція 3 табл.3)

Вплив кількості прихованих шарів розглянуто на прикладі 27-ї паливної кампанії ХАЕС-1 (табл. 4). Приховані шари включали по 20 нейронів. Як вихідний сигнал було розглянуто струм ДПЗ КНВ-2 (ТВЗ-81), а як вхідні – КНВ у секторах симетрії 30° (ТВЗ-69, ТВЗ-83, ТВЗ-96), що відповідно до табл. 3, дає найменшу похибку визначення вихідного сигналу.

Таблиця 4

Відхилення результату розрахунку від фактичного значення для струмів ДПЗ КНВ-2, ХАЕС-1, 27-ме паливне завантаження, в залежності від кількості прихованих шарів

№	Кількість вхідних КНВ	Розташування вхідних КНВ в активній зоні	Кількість прихованих шарів	Максимальне відхилення, %
1	3	симетрично за сектором 30°	2	5,7
2			1	3,22
3			0	1,45

Більша кількість прихованих шарів не обов'язково призводить до кращої оцінки вихідних сигналів. Для вирішення даної задачі може бути рекомендовано використання нейронних мереж без прихованих шарів.

Порівняння алгоритмів навчання нейронних мереж розглянуто на прикладі 26-ї та 27-ї паливних кампаній ЗАЕС-5 (табл. 5).

Таблиця 5

Відхилення результату розрахунку від фактичного значення для струмів ДПЗ ЗАЕС-5 в залежності від алгоритму навчання

№	Паливна кампанія	№ ТВЗ	Алгоритм навчання	Максимальне відхилення, %
1	26	8	L-BFGS	5,47
2			Левенберга-Марквардта	1,66
3	27	77	L-BFGS	3,99
4			Левенберга-Марквардта	101,27

Як видно з порівняння першого та другого результатів розрахунків, при відновленні струмів ДПЗ (ТВЗ-8) для 26-ї паливної кампанії алгоритм навчання Левенберга-Марквардта показав краще відновлення струмів ДПЗ. Дана тенденція спостерігається для більшості розрахунків, хоча можуть мати місце і протилежні випадки.

Для 27-ї паливної кампанії сигнали струму ДПЗ у восьмому наборі даних сильно відрізнялися від тих значень, що використовувалися при навчанні нейронної мережі.

Алгоритм навчання L-BFGS показав значно краще відновлення струмів ДПЗ для восьмого набору даних; для інших наборів даних з невеликою перевагою кращим виявився алгоритм Левенберга-Марквардта. Для прийняттого відновлення струмів ДПЗ варто навчати нейронну мережу на широкому діапазоні даних. Також не варто прагнути максимальної мінімізації похибки при навчанні мережі, оскільки сама мережа може «перевчитися» і втратити здатність до узагальнення.

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу виконано з метою вирішення актуального науково-технічного завдання – підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом розширення можливостей спостереження за активною зоною РУ типу ВВЕР-1000, а саме: введенням моніторингу як за вібростаном ВКП і ТВЗ, так і за важливими експлуатаційними параметрами, такими як локальна швидкість теплоносія, температурний коефіцієнт реактивності; та впровадженням в експлуатаційну практику реакторів типу ВВЕР сучасних методів нейтронно-шумової діагностики.

Задля досягнення поставленої мети було розв'язано низку завдань і зроблено наведені нижче висновки.

- 1) Після проведення аналізу було виявлено, що в проектних системах контролю реакторів типу ВВЕР-1000 – СВРК та АКНП – не було реалізовано функцій контролю та діагностики вібростану ВКП, ТВЗ, а також функції моніторингу інших важливих параметрів активної зони. В роботі вперше було реалізовано розробку та впровадження сучасних методів нейтронно-шумової діагностики в КСД реактору типу ВВЕР-1000 на АЕС України, що наразі забезпечує реалізацію перелічених вище задач моніторингу стану активної зони. В рамках виконання науково-технічних задач розробки КСД було проведено систематизацію методів аналізу нейтронних шумів та обрано для реалізації найбільш інформативні кореляційні та спектральні методи для застосування в локальних системах КСД ВВЕР-1000.
- 2) Набули подальшого розвитку моделі віброшумової діагностики, відповідно до яких було розроблено ПЗ на мові програмування С# для проведення аналізу шумів, що отримуються від нейтронних детекторів реактора. Особливістю виконаної роботи є те, що вперше було доведено стійкість моделей аналізу нейтронних шумів до глобального шуму, а також вдосконалено методи оцінки часу запізнення, які дозволяють здійснювати моніторинг за швидкістю теплоносія в активній зоні реактора в умовах значного глобального нейтронного шуму. Деякі з методів оцінки часу запізнення, такі, як узагальнені взаємкореляційні функції, використано нами вперше для виконання аналізу нейтронних шумів. Більшість із розроблених моделей показали прийнятну стійкість до глобального шуму. Найменш стійкою до глобального шуму виявилася ВКФ.
- 3) Протягом декількох паливних кампаній було виконано всебічне дослідження спектральних параметрів сигналів від 140 ДПЗ для ЮУАЕС-1 та 448 ДПЗ для ЗАЕС-1, що для такої кількості ДПЗ зроблено вперше з частотою опитування 436 Гц. Було визначено та підтверджено основні характерні частоти збурюючих сил, що впливають на вібростан ВКП і ТВЗ. Було виконано оцінку часу запізнення між різними парами ДПЗ, а також обґрунтовано вибір діапазону частот 0–1 Гц для оцінки часу запізнення з нахилу фази ВСГП. При цьому відхилення оцінки часу запізнення за нахилом фази ВСГП пари периферійних ДПЗ від суми

оцінок пар суміжних ДПЗ становить менше 5 %. Метод оцінки часу запізнення за нахилом фази ВСГП було обґрунтовано як найбільш стійкий до глобального шуму.

- 4) Вперше виконано комплексне дослідження ознак вібрацій ВКП і ТВЗ реактора типу ВВЕР-1000 на основі інформації від всіх ДПЗ (448 ДПЗ) та з такою високою частотою опитування (436 Гц для ЗАЕС). Вперше обґрунтовано, що гармоніки на частотах, кратних ~ 5 Гц на спектрах ДПЗ ЗАЕС, зумовлені «биттям» елементів конструкції ТВЗ. Також було надано рекомендації щодо встановлення попереджувальних та аварійних меж для формування захистів за визначеними ознаками на основі моделей діагностування вібростану та діагностичних порогів за середньоквадратичним відхиленням значень нейтронного потоку, а також за спектральними образами нейтронних шумів (за амплітудою та частотою). Відповідно до розроблених моделей передбачається спрацювання попереджувального та аварійного повідомлення, відповідно, у наступних випадках: збільшення середньоквадратичного відхилення нейтронного потоку в 5 та 10 разів; зміна положення піків характерних частот на 0,3 та 0,5 Гц; збільшення амплітуди піків характерних частот відносно еталонного стану на 30 % та 50 %.
- 5) Було розв'язано задачу визначення локальності ДПЗ до нейтронно-фізичних процесів, та, відповідно, і до вібропроцесів, що впливають на формування сигналу ДПЗ. При цьому було визначено внесок (вагові коефіцієнти) у сигнал ДПЗ від окремих твелів суміжних ТВЗ, що дало змогу локалізувати вібрації ТВЗ. Також було встановлено, що сигнал ДПЗ на $\sim 70\text{--}75$ % формується від нейтронів, згенерованих твелями ТВЗ, в якій розташовано сам ДПЗ, а за висотою активної зони сигнал ДПЗ на ~ 77 % формується нейтронами, згенерованими на рівні самого ДПЗ (зони висотою 250 мм). Отримані результати дозволили встановити, що сигнал ДПЗ визначає вібростан саме тієї ТВЗ, в якій цей ДПЗ розташовано, і саме на тій висоті, на якій цей ДПЗ розташовано.
- 6) Вперше було показано можливість відновлення сигналів ДПЗ із застосуванням нейронних мереж. Відновлення сигналів ДПЗ показано як таке, що є можливим з похибкою не більше 2 % за умови навчання нейронної мережі на широкому діапазоні даних, що уможливило відновлення значення струму ДПЗ, який вийшов з ладу, а також дозволяє забезпечити контроль енергорозподілу в ТВЗ з даним ДПЗ. Показано важливість вибору для нейронної мережі таких вхідних сигналів, що найбільшим чином визначають характер вихідного сигналу. Так, при подаванні на вхід нейронної мережі сигналів ДПЗ у секторах симетрії 30° до вихідного сигналу похибка була в 3–4 рази меншою порівняно з випадком, коли на вхід подавалися сигнали всіх ДПЗ активної зони.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. Борисенко В.И., **Горанчук В.В.** Определение консервативных параметров модели реактора для исследования переходных режимов работы ВВЭР-1000 // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля, 2013. вип. 20, науково-технічний збірник, м.Чернобиль. 2013. С. 28–36.
Здобувачу особисто належить постановка задачі, розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.
2. Борисенко В.И., **Горанчук В.В.**, Крушинский А.Г. Исследование режима работы ВВЭР-1000 при отключении последнего питательного турбонасоса с уровня мощности менее 25 % номинальной // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля, вип. 20, науково-технічний збірник, м.Чернобиль. 2013. С. 37–44.
Здобувачу особисто належить проведення розрахунків, аналіз результатів.
3. Борисенко В.И., Волох А.Ф., **Горанчук В.В.**, Сидорук Н.М. Экспериментальное определение подкритичности энергетического ядерного реактора // Ядерна фізика та енергетика. 2014. Т.15. №1. С.35–42.
Здобувачу особисто належить проведення розрахунків підкритичності ВВР-М, аналіз отриманих результатів.
4. Борисенко В.И., Пионтковский Ю.Ф., **Горанчук В.В.** Модель формирования сигнала внутризонного детектора нейтронов // Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. №4. С. 364–373.
Здобувачу особисто належить аналіз технічної документації, підготовка даних, аналіз отриманих результатів.
5. Борисенко В.И., Будик Д.В., **Горанчук В.В.** Застосування методів аналізу шумів у системах діагностики реакторів типу ВВЕР // Ядерна та радіаційна безпека. 2017. №1 (73). С. 48–53.
Здобувачу особисто належить аналіз та вибір алгоритмів шумової діагностики, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.
6. Борисенко В.И., **Горанчук В.В.**, Пионтковский Ю.Ф., Сапон Н.Н. Выбор консервативных допущений при обосновании ядерной безопасности систем хранения отработанного ядерного топлива // Ядерна та радіаційна безпека. 2017. №2 (74). С. 69–73.
Здобувачу особисто належить постановка задачі, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.
7. Борисенко В.И., Пионтковский Ю.Ф., **Горанчук В.В.** Исследование моделей родиевого эмиттера детектора прямого заряда // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля, вип. 28, науково-технічний збірник, м.Чернобиль. 2017. С. 25–33.
Здобувачу особисто належить аналіз технічної документації, підготовка даних, аналіз отриманих результатів.
8. Борисенко В.И., **Горанчук В.В.**, Піонтковський Ю.Ф. Визначення консервативних припущень при обґрунтуванні ядерної безпеки систем

зберігання ВТВЗ ВВЕР-440 // Науково-виробничий журнал «Ядерна енергетика та довкілля» № 1 (9). 2017. С. 13–17.

Здобувачу особисто належить проведення розрахунків, аналіз результатів.

9. Борисенко В.І., **Горанчук В.В.** Використання технології нейронних мереж для відновлення сигналів детекторів, які вийшли з ладу // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, вип. 30, науково-технічний збірник, м.Чорнобиль. 2018. С. 17–23.

Здобувачу особисто належить постановка задачі, аналіз архітектур та методів навчання нейронних мереж, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

2. Опубліковані праці апробаційного характеру

10. Борисенко В.І., **Горанчук В.В.** Моделювання роботи захисних систем безпеки ВВЕР-1000 // Тези доповідей. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави», 16–18 квітня 2013 р. С. 53–54.

Здобувачу особисто належить проведення розрахунків, аналіз результатів.

11. **Горанчук В.В.**, Борисенко В.І. Використання методів шумової діагностики для визначення параметрів безпеки ВВЕР // Тези доповідей. XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 1–5 лютого 2016 р. С. 95.

Здобувачу особисто належить аналіз алгоритмів шумової діагностики, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

12. **Горанчук В.В.**, Борисенко В.І. Визначення параметрів безпеки ВВЕР в системі внутрішньореакторної шумової діагностики // Збірник доповідей. П'ята міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики». Одеса. 5–9 вересня 2016. С. 25–32.

Здобувачу особисто належить аналіз алгоритмів шумової діагностики, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

13. Борисенко В.І., **Горанчук В.В.**, Піонтковський Ю.Ф., Сапон М.М. Аналіз ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива ВВЕР // Тези доповідей. XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 10–13 квітня 2017. С. 112–113.

Здобувачу особисто належить проведення розрахунків, аналіз результатів.

14. **Горанчук В.В.**, Борисенко В.І. Застосування нейронних мереж для вирішення задач діагностики ДПЗ за даними СВРК // Тези доповідей. XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 16–20 квітня 2018 р. С. 91.

Здобувачу особисто належить постановка задачі, аналіз архітектур та методів навчання нейронних мереж, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

АНОТАЦІЯ

Горанчук В.В. Моніторинг активної зони ВВЕР-1000 методами нейтронно-шумової діагностики. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 «Теплові та ядерні енергоустановки» (143 – Атомна енергетика). Робота виконана в Інституті проблем безпеки (ІПБ) АЕС НАН України. Захист відбудеться у спеціалізованій вченій раді ІПБ АЕС НАН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання: підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом розширення можливості спостереження за активною зоною реактору типу ВВЕР-1000, а саме: шляхом впровадження моніторингу за вібростаном внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) і тепловидільних збірок (ТВЗ), а також моніторингу за важливими параметрами, такими як поканальна швидкість теплоносія, температурний коефіцієнт реактивності; а також шляхом впровадження в експлуатаційну практику реакторів типу ВВЕР сучасних систем нейтронно-шумової діагностики.

Представлено аналіз та систематизацію методів нейтронно-шумової діагностики, виконано вибір найбільш інформативних з них для застосування в системах моніторингу та діагностики ВВЕР-1000. Виконано розробку методів, алгоритмів та програмного забезпечення (ПЗ) для аналізу шумів нейтронних детекторів реактора.

Проведено аналіз шумової складової сигналів детекторів прямого заряду (ДПЗ) та іонізаційних камер (ІК). Визначено та підтверджено основні характерні частоти збурюючих сил, що впливають на вібростан ВКП і ТВЗ. Розроблено моделі діагностування вібростану та діагностичні пороги. Виконано оцінку часу запізнення проходження флуктуації теплоносія вздовж ТВЗ різними методами.

Розв'язано задачу визначення локальності ДПЗ до нейтронних процесів, та, відповідно, і до вібропроцесів, що впливають на сигнал ДПЗ.

Показано можливість відновлення сигналів ДПЗ, що вийшли з ладу, з використанням нейронних мереж. Визначено вхідні сигнали, що дають найменшу похибку розрахунку; приведено порівняння алгоритмів навчання.

Проведено верифікацію розробленого ПЗ на тестових даних. Всі розроблені моделі та алгоритми показали коректну роботу. Виконано валідацію ПЗ на даних сигналів нейтронних детекторів ВП ЮУАЕС та ВП ЗАЕС.

Ключові слова: внутрішньокорпусні пристрої, тепловидільна збірка, детектор прямого заряду, система моніторингу, система внутрішньореакторної шумової діагностики, час запізнення, швидкість теплоносія, вібрації, нейтронний шум, нейронні мережі.

ANNOTATION

Goranchuk V.V. Monitoring of VVER-1000 core by methods of neutron-noise diagnostic.

The thesis for scientific degree of the candidate of technical sciences under the specialty 05.14.14 "Thermal and nuclear power plants" (143 – Atomic power). This work was performed in Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine. The defense of the thesis will be held at the specialized scientific council of Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to the solution of an actual scientific and technical task: enhancement of the NPP operation safety by expanding the VVER-1000 core monitor ability, in particular, by implementing of: reactor internals (RI) and fuel assemblies (FA) vibration monitoring, as well as monitoring of important parameters, such as the local coolant velocity, moderator temperature coefficient of reactivity; and up-to-date neutron-noise diagnostics systems into the VVER operational practice.

Before the beginning of these works the systems of VVER-1000 neutron noise monitoring and diagnostics were not applied at NPPs of Ukraine, and additional research must be conducted for these systems implementation.

The analysis and systematization of neutron-noise diagnostics methods as well as selection of the most informative ones of them for application at the VVER-1000 monitoring and diagnostics systems are presented. The analysis of the noise component of signals of self-powered neutron detectors (SPND) and ionization chambers (IC) has been carried out. For the first time the analysis of spectral and other signal parameters of 245 SPND of VVER-1000 was performed during several fuel campaigns with sampling rate 436 Hz that is higher essentially than in previous studies. These aspects allowed to determine additional vibration frequencies. The main characteristic frequencies of disturbing forces that influence the vibrations of RIs and FAs are determined and proved.

Vibrational diagnostic models and diagnostic thresholds have been developed for the root mean square deviation of neutron flux, as well as for signs of neutron noise. The estimation of the coolant fluctuations transit time by various methods has been carried out. It was shown, which of methods are the most resistant to global neutron noise, and the ways are determined to improve the estimation of the transit time. The selection of frequency range to estimate the transit time from the phase of cross power spectral density was justified. The models of vibration diagnostics were implemented in the in-core noise diagnostic system.

Problem of the SPND locality determination was solved, namely, by determining at what distance the signal of SPND is sensitive to the vibration and other processes that take place in the area of the SPND location and that modulate this signal. The contribution of fuel rods to the signal of SPND was determined in accordance with their location in regard to the SPND. This allowed to localize the FAs vibrations.

It was shown the possibility to restore the signal of the failed SPND by means of neural networks. It was demonstrated that the SPND signal recovery is possible with an inaccuracy not more than 2 % under condition of neural network training in wide range of data. This allows to provide the control of energy distribution in the FA, where the failed SPND is located. Modeling was carried out for different SPNDs (differences are within a year of these SPND using as well as in their location in the core) for different power units. The input signals that give a minimal inaccuracy were determined, the comparison of training algorithms was presented. The importance of such input signals selection for the neural network that determine the nature of the output signal most was stressed. The best architecture of the neural network was determined.

To calculate the correlation and spectral functions, as well as to create artificial neural networks, appropriate software was developed in the C# programming language.

Verification of the developed software with test data was carried out. All developed models and algorithms showed their correct work. Validation of software was carried out at signals from neutron detectors located in units of Ukrainian NPPs.

Keywords: reactor internals, fuel assembly, self-powered neutron detector, in-core monitoring system, in-core noise diagnostic system, transit time, coolant velocity, vibration, neutron-noise, neural networks.