

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

*Горанчука Вадима Вікторовича*

**«Моніторинг активної зони ВВЕР-1000 методами нейтронно-шумової  
діагностики»**

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота Горанчука В.В. спрямована на підвищення безпеки реакторів типу ВВЕР-1000 шляхом удосконалення методів моніторингу за станом активної зони. Актуальність роботи визначається необхідністю розробки нових систем моніторингу та діагностики стану реакторів типу ВВЕР-1000, а також удосконалення тих, що вже існують, в рамках реалізації вимог при продовженні терміну експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки.

Ціль роботи - забезпечення контролю за вібростаном внутрішньокорпусних пристройів (ВКП) та тепловидільних збірок (ТВЗ), що є особливо актуальним у зв'язку із застосуванням на АЕС України ядерного палива (ТВЗ) нового покоління.

При цьому стан ВКП та ТВЗ при експлуатації реакторної установки визначається, в тому числі, величиною швидкості теплоносія через активну зону. Тому окремою задачею є виконання оцінки як загальної швидкості теплоносія через активну зону, так і локальної. Саме можливість і особливості визначення локальної швидкості теплоносія було також досліджено в роботі.

**Ступінь обґрутованості наукових положень, висновків і рекомендацій,** сформульованих у дисертаційній роботі В.В. Горанчука, є достатньою та базується на детальному та досить повному аналізі наукової

документації, літературних джерел за проблематикою роботи, що вирішувалась при виконанні даної роботи, коректно визначених меті та постановці завдань дослідження, використанні апробованих методів теоретичних досліджень із подальшим аналізом та порівнянням отриманих результатів, критичному аналізі результатів роботи, коректному формулюванні висновків дисертації.

Обґрунтованість і достовірність результатів досліджень, отриманих при вирішенні завдань в рамках дисертаційної роботи, підтверджено апробацією на конференціях, а також публікаціями статей у наукових фахових виданнях, у тому числі 4 статті, що входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.

**Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій.** Новизна наукових положень полягає у наступному:

- вдосконалено моделі оцінки часу запізнення проходження флюктуації параметрів теплоносія вздовж ТВЗ, що були побудованими, базуючись на синалах нейтронних детекторів, для забезпечення можливості моніторингу за швидкістю теплоносія в активній зоні реактора в умовах значного глобального нейтронного шуму. При цьому метод оцінки часу запізнення з використанням узагальнених взаємокореляційних функцій було використано вперше для аналізу саме нейтронних шумів;
- вперше досліджено та встановлено ознаки вібрацій ВКП та ТВЗ реактору типу ВВЕР-1000 на основі даних від 64 каналів нейтронних вимірювань (КНВ) та з частотою дискретизації 436 Гц, при цьому виявлено гармоніки «биття» елементів конструкції ТВЗ у спектрах ДПЗ ЗАЕС-1 на частотах, кратних  $\sim 5$  Гц;
- вперше визначено та обґрунтовано уставки формування захистів і блокувань за визначеними ознаками, а саме – спрацювання попереджуvalного та аварійного повідомлення, відповідно, у наступних випадках: збільшення середньоквадратичного відхилення нейтронного потоку в 5 та 10 разів; зміна положення піків характерних частот на величину 0,3 та 0,5 Гц; збільшення

амплітуди піків характерних частот відносно еталонного стану на величину 30 та 50 %;

– вперше реалізовано алгоритм відновлення сигналів ДПЗ із застосуванням нейронних мереж з похибкою не більше 2 % за умови навчання нейронної мережі на основі широкого діапазону даних, що уможливлює визначення струму та відбраківку ДПЗ, який вийшов з ладу.

#### **Практичне значення результатів дисертаційного дослідження.**

Розроблені розрахункові алгоритми та програми віброшумової діагностики вже впроваджено в системи внутрішньореакторної шумової діагностики (СВРШД), що постачаються на АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000 в складі комплексної системи діагностики (КСД). Проведений у дисертаційні роботі аналіз сигналів ДПЗ дозволяє виявляти аномалії в вібраціях ВКП та ТВЗ.

Практичне використання результатів дисертації підтверджено актом впровадження.

**Повнота викладу в опублікованих працях положень, висновків, рекомендацій.** Результати автора дисертації опубліковано у 14 роботах, з них 9 - статті у провідних фахових виданнях. Результати дисертації було багаторазово апробовано на міжнародних і вітчизняних наукових конференція

**Загальна характеристика структури та змісту роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків.

У **Вступі** викладено загальну характеристику роботи, а саме: актуальність теми дослідження, мету і завдання дослідження, представлено наукову новизну отриманих результатів, підкреслено особистий внесок здобувача, наведено результати апробації матеріалів дисертаційної роботи та її зв'язок з НДР, а також деталізовано структуру та обсяг самої роботи.

У **першому** розділі здобувач проаналізував попередні роботи з нейтронно-шумового моніторингу та діагностики активних зон ядерних реакторів. Огляд

попередніх досліджень виконано окремо для таких напрямків: вібрації; швидкості теплоносія; температурного коефіцієнту реактивності; теплогідравлічних процесів та для технології нейронних мереж. Також наведено опис наявних у світі закордонних систем моніторингу та діагностики компаній Electricite de France, AREVA NP, Westinghouse.

Проведений аналіз показав, що на АЕС України дотепер не було реалізовано функцій моніторингу та діагностики за вібростаном ВКП та ТВЗ, а також функцій моніторингу за локальною швидкістю теплоносія та температурним коефіцієнтом реактивності (ТКР).

На підставі проведеного огляду зроблено висновок, що для впровадження відповідних систем необхідно виконати наукові дослідження та інженерні роботи для адаптації методів аналізу нейтронних шумів до кожної конкретної РУ, оскільки завжди є наявними відмінності спектральних характеристик вібрацій обладнання навіть для реакторів одного типу.

Також було визначено наукові завдання, що потрібно вирішити задля впровадження систем нейтронно-шумового моніторингу та діагностики для реакторів типу ВВЕР-1000.

**У другому розділі** проведено аналіз та систематизацію методів нейтронно-шумової діагностики. При цьому представлено верифікацію розрахункових програм аналізу нейтронних шумів для моніторингу вібростану ВКП і ТВЗ, що передбачають визначення: швидкого перетворення Фур'є, авто- та взаємоспектральної густин потужності, а також когерентності.

Крім того, для забезпечення можливості розрахунку умовно поканальної (локальної) швидкості теплоносія, було проведено верифікацію розрахункових програм, що передбачають визначення: взаємокореляційної функції, реосансу, імпульсної переходної функції, узагальненої взаємокореляційної функції з фазовим перетворенням, узагальненої взаємокореляційної функції максимальної правдоподібності та фази взаємоспектральної густин потужності. Було продемонстровано можливість підвищення якості отриманих результатів за

рахунок використання цифрової фільтрації, що є особливо актуальним для взаємокореляційної функції.

У третьому розділі проведено дослідження шумової складової сигналів детекторів прямого заряду (ДПЗ) та іонізаційних камер (ІК). Це, в свою чергу, дало змогу визначити вібростан ВКП і ТВЗ, оскільки при вібраціях ВКП і ТВЗ відбувається зміна геометрії в системі «паливо-сповільнювач-детектор», що, в результаті, зумовлює зміну струму нейtronного детектора (ДПЗ). Власне цей ефект і було досліджено в роботі з використанням методів нейtronно-шумової діагностики.

У даному розділі представлено результати аналізу зміни спектральних характеристик сигналів ДПЗ (від 20 каналів нейtronних вимірювань (КНВ) - для ЮУАЕС-1, та від 64 КНВ - для ЗАЕС-1), отриманих протягом двох паливних кампаній на енергоблоці № 1 ВП ЮУАЕС та на енергоблоці №1 ВП ЗАЕС. При цьому частота дискретизації для ЗАЕС-1 була 436 Гц і більшою, ніж у схожих дослідженнях, проведених раніше іншими дослідниками. І саме цей факт дозволив визначити додаткові інформаційні частоти вібрацій.

Також у даному розділі було визначено та підтверджено основні характерні частоти збурюючих сил, що впливають на вібростан ВКП і ТВЗ, а саме: акустичні стоячі хвилі та частота обертання головного циркуляційного насоса (ГЦН). Показником чутливості вимірювального каналу була обраною наявність у спектрі гармонік частоти обертання ГЦН з величинами 16,6 та 33,3 Гц.

Крім того, було продемонстровано можливість визначення локальної швидкості теплоносія при виконанні аналізу сигналів нейtronних детекторів. Розглянуті методи передбачають визначення часу, за який флюктуація тиску, температури або іншої неоднорідності теплоносія проходить від одного ДПЗ до іншого ДПЗ, що власне і викликає зміну струму ДПЗ. Було виконано оцінки часу запізнення сигналів ДПЗ, що розташовані в одному КНВ, різними методами та показано, що найбільш стійким до глобального нейtronного шуму є метод

визначення часу запізнення з фази взаємноспектральної густини потужності. Проведено дослідження можливості реалізації оперативного визначення температурного коефіцієнта реактивності в складі системи внутрішньореакторної шумової діагностики реактору типу ВВЕР-1000 при доступності інформації від термопар на виході з ТВЗ.

У четвертому розділі визначено розміри області, процеси в якій моделюють сигнал ДПЗ, що дало змогу оцінити, на якій відстані сигнал ДПЗ є чутливим до вібраційних та інших процесів. Було розраховано внесок у сигнал ДПЗ як від зон за висотою ТВЗ, так і від окремих твель суміжних ТВЗ. Отримані результати дозволили визначити область вібрації ТВЗ, оскільки було показано, що сигнал ДПЗ визначає вібростан саме тієї ТВЗ, в якій цей ДПЗ розташовано, і саме на тій висоті, на якій цей ДПЗ розташовано.

У п'ятому розділі досліджено можливість модельного відтворення сигналу, відсутнього через фізичне пошкодження детектора, з використанням технології нейронних мереж.

Показано, що відтворення сигналу ДПЗ можливе з похибкою не більше 2% за умови навчання на широкому діапазоні даних, що дозволяє застосування нейронних мереж для відтворення струму ДПЗ, який вийшов з ладу.

У прикінцевій частині дисертації сформульовано **висновки** та стисло наведено основні результати досліджень.

### **Зауваження та дискусійні положення дисертаційного дослідження**

У цілому, дисертація В.В.Горанчука є актуальну і завершеною науково-дослідницькою роботою, що містить нові результати досліджень оцінки вібростану ВКП та ТВЗ РУ типу ВВЕР-1000 з метою попередження аварійних ситуацій, і, як наслідок, підвищення надійної та безпечної експлуатації ядерних реакторів на АЕС України. При цьому встановлено чіткий зв'язок між вібростаном ВКП і ТВЗ, з однієї сторони, та швидкістю теплоносія і значенням ТКР, алгоритм та вирази для яких наведено та обґрутовано в роботі. Загалом,

дисертація написана гарною науковою мовою, за винятком деяких моментів, що потребували б невеликих коригувань. Разом з цим, під час опрацювання дисертаційної роботи сформулювалися наступні зауваження.

- 1) На стор. 89, рис. 3.5, не пояснено наявність піку при частоті 20 Гц.
- 2) На стор. 100 наведено вирази (3.3) та (3.4), що вводять спеціальні статистики порівняння спектральних густин, але чомусь про статистичну похибку таких статистик автор жодним чином не згадує і декларує рівність нулю лише за умови їх абсолютної рівності без урахування похибок.
- 3) На стор. 102 у виразі (3.7) пропонується використовувати середнє значення за об'ємом зміни температури, при цьому не наведено жодного слова про те, що це за об'єм. На цій же сторінці робиться припущення про відносну однорідність зміни температури, але критерій такої однорідності не наведено.
- 4) На стор. 110 наведено вираз (3.37) для опису переміщення об'єкта, але жодного обґрунтування того, чому так можна робити – немає.
- 5) На стор. 121 наведено дані про так звані ядерні реакції, що відбуваються в ДПЗ:  $(n,\beta)$ ;  $(n,\gamma,e)$ ;  $(\gamma,e)$ . При цьому автор путає є за сенсом ядерною реакцією, а що - розпадом продукту ядерної реакції.
- 6) На стор. 62 наведено речення: «Існує кілька різних коефіцієнтів кореляції...», де пропущено слово «виразів»; «N- довжина вибірки», а треба: «обсяг»; стор. 85: занадто довгі речення, що призводять до втрати сенсу «... то мінімальна крок...»; стор. 87: «... на протязі...», треба: «протягом»; на стор. 102 «...шлях розрахунку середньої температури...» - є невдалим виразом; на стор. 122 маємо «...жорстких фотонів...» та «...реакторних фотонів...» - вирази, що є вкрай невдалими.

У тексті дисертаційної роботи є присутніми також деякі стилістичні та очевидні друкарські помилки, а також наявними русизми в незначній кількості та некоректно побудовані деякі речення.

Зазначені зауваження не знижують загальної дуже високої оцінки результатів, що їх отримано в дисертаційній роботі В.В.Горанчука.

Положення і висновки, що викладено в дисертації, розроблений метод дослідження вібростану ВКП та ТВЗ реакторів типу ВВЕР-1000 доцільно рекомендувати для використання при подальшому проведенні робіт з продовження строку експлуатації реакторів типу ВВЕР-1000 з метою значно більш глибокого розуміння процесів, які відбуваються в реакторній установці.

Автореферат повністю відображає основний зміст виконаних досліджень і отриманих результатів дисертаційної роботи та є оформленним згідно з вимогами ДАК МОН України.

#### **Висновок щодо відповідності дисертації вимогам ДАК України**

З матеріалів, представлених у дисертаційній роботі, можна констатувати, що В.В.Горанчук є кваліфікованим науковцем, який вільно та досконало володіє сучасними аналітичними та чисельними методами у прикладній математиці, фізиці та програмуванні.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота "Моніторинг активної зони ВВЕР-1000 методами нейтронно-шумової діагностики" є закінченою науково-дослідною роботою, в якій розроблено новий підхід до встановлення ознак вібрацій ВКП і ТВЗ реактору типу ВВЕР-1000 та визначення на підставі всебічного обґрунтування уставок формування захистів і блокувань за визначеними ознаками.

За актуальністю, обсягом проведених досліджень, рівнем і кількістю публікацій та новизною отриманих результатів дисертація повністю відповідає вимогам п.п.9, 11, 12 і 13 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою КМУ від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від

30.12.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор Вадим Вікторович Горанчук, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки.

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри ядерної фізики  
фізичного факультету Київського  
національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
доктор фіз.-мат. наук, проф.



I.M.Каденко

