

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ФЛУКТУАЦІЙ СИГНАЛІВ ШТАТНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ ВВЕР-1000

А.Д. Скорбун¹, В.Г. Котеленець², А.В. Дробецький²

*¹Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України,
Чорнобиль, Україна;*

²Відокремлений підрозділ «Южно-Українська АЕС»

*Державного підприємства «НАЕК «Енергоатом», Миколаївська обл., Южноукраїнськ
E-mail: anskorbun@gmail.com*

Проаналізовано динаміку флуктуацій сигналів від блоків детектування щільності потоку нейтронів (БДЩН), які контролюють щільність нейтронного потоку в активній зоні реактора. Сигнали, що аналізувалися, являють собою довгі часові ряди даних, які отримуються в процесі безперервного контролю за станом обладнання атомної станції штатними системами контролю і при роботі на потужності реакторної установки ВВЕР-1000 у стаціонарному режимі. З використанням вейвлет-аналізу показано, що у флуктуаціях цих сигналів не просто спостерігаються періодичні явища, вони ще відображають динаміку нейтронної підсистеми працюючого реактора. Таким чином, однозначно показано, що флуктуації сигналів з БДЩН не є випадковим шумом, а в дійсності вони є корисною складовою загального сигналу, що відображає динаміку процесів, які контролюються даним блоком детектування.

ВСТУП

У роботах [1–3], в яких розвивається ідея, що шуми датчиків системи внутрішньореакторного контролю містять корисну інформацію, було показано на прикладі різних датчиків, що в цих шумах існують певні закономірності, за якими вдалося розрізнити шуми датчиків першого і другого контурів. Але при цьому весь час виникає запитання, з чим, тобто з якими чинниками, пов'язані ті чи інші виявлені в шумах закономірності і чи характеризують вони роботу конкретних систем взагалі. Дати відповідь на це запитання досить складно, тому що єдиний спосіб отримати надійну відповідь, це одержати ефект у контрольованих умовах, що реально неможливо. Таким чином, запитання про те, що корисного може бути в отриманій із шумів інформації, залишається відкритим.

Тим не менше в даній роботі на окремому прикладі буде показано, що флуктуації показань приладу при роботі на потужності реакторної установки ВВЕР-1000 у стаціонарному режимі, можна прив'язати до конкретної системи без експериментів на стенді. І тим самим показати, що шуми сигналів з блоків детектувань містять корисну інформацію про роботу системи, яка контролюється.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ

У роботі аналізуються сигнали з апаратури контролю за нейтронним потоком, отримані при роботі реакторної установки в стаціонарному режимі на номінальній потужності, а саме: сигнали від трьох каналів (1, 8, 15), змішених на 120° по поперечному перетину реактора відносно один одного (рис. 1). На номінальній потужності пристрої детектування потоку нейтронів працюють у режимі «ДР2» (діапазон робочий лінійний), і кожен канал виконує збір та обробку інформації за сигналами від

двох блоків детектування щільності потоку нейтронів (БДЩН): нижнього – БДЩНн і верхнього – БДЩНв. Ці блоки детектування (різних каналів) розташовані приблизно на однаковій висоті відносно середини активної зони. Інтегровані дані від БДЩНн та БДЩНв представляють собою сигнал від одного каналу.

Слід підкреслити, що сигнал зовні є досить стабільним. Кілька послідовних значень наведено в таблиці для ілюстрації якості вихідних даних для аналізу. Зміни спостерігаються лише в першому знаку після коми, тобто не перевищують одного відсотка і для всіх трьох каналів знаходяться в одному і тому ж діапазоні. Вибірка сигналів зроблена з періодичністю в 1 с.

Час	Потужність $N_{\text{ном}}$, %		
	№1	№8	№15
10:00:02	100,703	100,672	100,641
10:00:03	100,539	100,328	100,641
10:00:04	100,594	100,461	100,641
10:00:05	100,594	100,602	100,641
10:00:06	100,641	100,391	100,594
10:00:07	100,422	100,672	100,297
10:00:08	100,375	100,391	100,734

Для аналізу даних використовувався вейвлет-аналіз [4], який дозволяє відслідковувати зміни складових сигналу в часі, і з точки зору поставленої задачі є дуже наочним. Принцип вейвлет-аналізу наступний. Ряд регулярних вимірювань розглядається як деяка функція часу. Вибирається спеціальна функція (так званий вейвлет, у нашому випадку похідна від гауссової функції), розмір якої в часі значно менший від загального розміру функції, яка аналізується. Далі «віконним» способом розраховується кореляція такого вейвлету з відповідною ділянкою функції, яка аналізується, шляхом поступового переміщення «вікна» на один крок. В результаті чого утворюється ряд

коефіцієнтів кореляції. Потім розмір (масштаб) вейвлету збільшується і процедура повторюється. Таким способом утворюються ряди коефіцієнтів для

різних масштабів. Якщо вигляд ділянки функції, яка аналізується, є близьким до вигляду вейвлету, коефіцієнт кореляції збільшується.

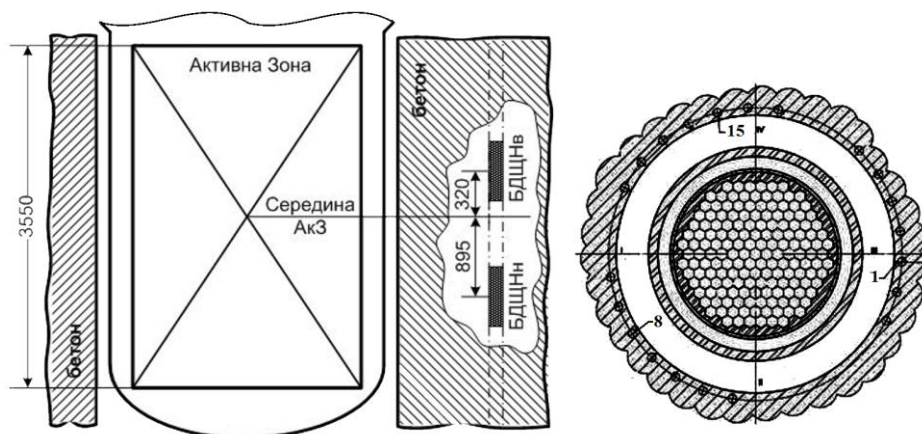


Рис. 1. Ескіз схеми розміщення блоків детектування

Таким чином утворюється двовимірний розклад функції, яка аналізується, по горизонтальній осі якої відкладено час, а по вертикалі – масштаб (або період) вейвлету (рис. 2–4). При наявності у функції, яка аналізується, на якомусь проміжку часу періодичності (наприклад, прихована в шумах модуляція синусоїдою, виникнення автоколивань тощо), на двовимірній картині виділяється закономірна серія «плям» з підвищеними значеннями цих коефіцієнтів. Кожна пляма відповідає максимуму або мінімуму модулюючої синусоїди, тобто відстань між плямами дорівнює півперіоду. Для нас важливо, що в результаті ми можемо не лише відмічати наявність періодичності, а й досить точно фіксувати час, коли вона спостерігається.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Основна ідея роботи полягає в наступному. Беруться для аналізу сигнали від кількох блоків детектування потоку нейтронів. Тобто точно відомо, що контролюється один і той же об'єкт (нейтрони), який, як видно з таблиці, є достатньо стабільним. Якщо у флуктуаціях цих сигналів (які вважаються випадковими шумами) будуть знайдені характерні особливості, які проявляються в один і той же час на різних детекторах, це буде означати, що ці флуктуації не є випадковими, а мають одну і ту ж причину – флуктуації нейтронного поля. Іншими словами, слабкі флуктуації сигналу з нейтронного детектора будуть давати інформацію саме про динаміку поля нейтронів.

Результати вейвлет-аналізу сигналів від вказаних вище детекторів представлено на рис. 2–4. На кожному рисунку зліва показано двовимірну картину вейвлет-розкладу у вигляді рисунка, на якому чітко видно серію закономірно розташованих вдовж горизонтальної осі плям (для наочності вони показані білими стрілками). Оскільки кожному вимірюванню відповідає 1 с, відстань між плямами, яка дорівнює різниці порядкових номерів елементів вибірки, дає час у секундах. Програмними засобами

можна визначити положення в часі для кожної плями та відповідно розрахувати відстань між ними також в часі. Кожна пляма, тобто зростання коефіцієнтів вейвлет-розкладу, відображає максимум або мінімум періодичного процесу, отже відстань між плямами дорівнює напівперіоду. Результати відповідного аналізу по визначенню положення кожної плями в часі і період процесу наведено в таблицях для кожного рисунка. З цих таблиць можна одержати відповідь на запитання, чи несуть флуктуації сигналу деяку корисну інформацію, а більш ширше – чи фіксують ці блоки детектування динаміку саме того параметра, який контролюється?

Перший факт – з того, що картини вейвлет-розкладу дуже подібні, і з величин періодів, отриманих для кожного блока детектування (які теж попарно можна вважати достатньо близькими), а також з того, що всі блоки детектування фіксують одне і те ж явище, а саме нейтронний потік, можна дати позитивну відповідь: так, «випадкові» флуктуації проаналізованих сигналів містять інформацію про динаміку поля нейтронів.

Другий факт – з аналізу таблиць (див. рис. 2–4) можна зробити висновок, що «плями» з'являються в один і той же час для всіх детекторів. Звичайно, час появи плям, тобто положення їх на картинах вейвлет-розкладу, дещо відрізняється. Проте якщо порівняти різницю між положеннями відповідних плям для різних блоків детектування, то виявиться, що ніяких закономірних зміщень їхніх позицій не спостерігається. Більш точно середні значення зміщень позицій між відповідними плямами дорівнює -9,6 с, а середньоквадратичне відхилення – 112,0 с, тобто величини зміщень коливаються навколо нуля. Отже, з урахуванням аргументації з попереднього абзацу, з цього факту можна зробити аналогічний висновок: проаналізовані флуктуації сигналів з нейтронних детекторів не є (повністю) випадковими шумами, а відображають динаміку тієї системи (нейтронів), яка контролюється даними блоками детектування.

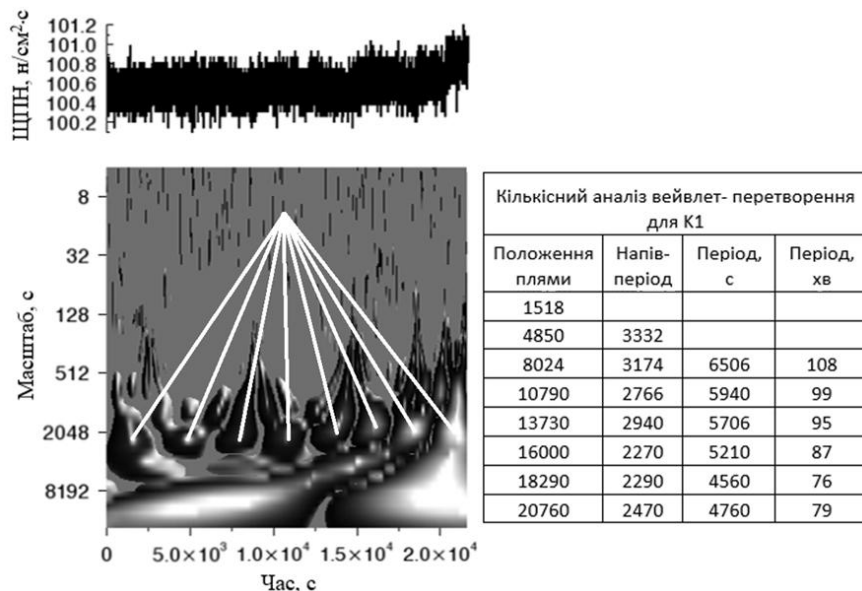


Рис. 2. Картина вейвлет-розкладу для сигналу з каналу K1, а також визначені з неї позиції показаних стрілками плям, відстань між ними та період процесу

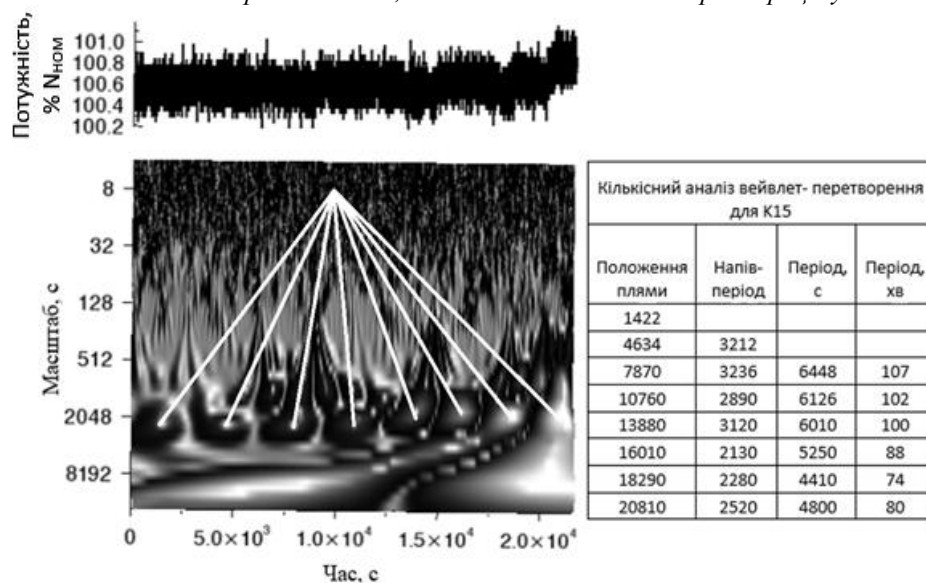


Рис. 3. Картина вейвлет-розкладу для сигналу з каналу K8, а також визначені з неї позиції показаних стрілками плям, відстань між ними та період процесу

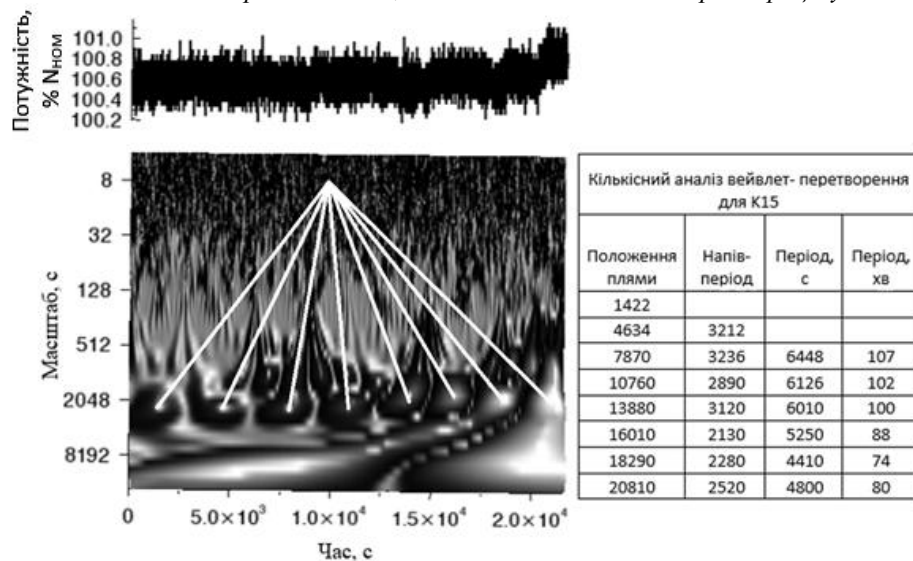


Рис. 4. Картина вейвлет-розкладу для сигналу з каналу K15, а також визначені з неї позиції показаних стрілками плям, відстань між ними та період процесу

Зауважимо, що аналіз динаміки, як такої, не входить у задачі даної роботи. Так, наприклад, досить очевидно, що період виявлених коливань зменшується з часом, причому також однаково для всіх блоків детектування. Аналіз таких явищ буде проведено в іншій роботі.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сигнали з блоків детектування штатної апаратури контролю за нейтронним потоком реактора ВВЕР-1000 при його роботі на потужності в стаціонарному режимі. Уперше надійно показано зв'язок флуктуацій цих сигналів, величина яких менша одного відсотка від величин власне сигналу, з динамікою системи, яка породжує ці сигнали. Показано, що флуктуації цих сигналів містять інформацію про стан нейтронного поля працюючого реактора. Отже показано, що ці флуктуації не є випадковими шумами, а самі по собі є корисним сигналом. Можна навіть сказати, що проаналізовані сигнали з блоків детектування потоку нейтронів складаються з двох однаково корисних частин – це величина сигналу, яка свідчить про потік нейтронів, і флуктуації цього сигналу, які несуть інформацію про динаміку цього потоку.

2. Чи можна поширити ці висновки на характеристики флуктуацій, які було виявлено в цитованих роботах, тобто на аналіз температур, тиску, рівня води на вході та виході першого контуру та ін. На жаль ні, у тому сенсі, що там спостерігається сумарний вплив багатьох чинників, а виділити внесок кожного з них поки що не вдалося. Достовірно встановити зв'язок флуктуацій з тим чи іншим чинником можна лише в спеціально поставлених експериментах, і то ще не факт, що результати таких стендових експериментів можна поширити на ситуацію в реакторі при наявності там інших чинників. Крім того, детекторів дуже багато, фізичних чинників також, тому важко уявити, що

такі експерименти навіть при бажанні буде зроблено за розумний час.

Однак той факт, що флуктуації сигналів штатних систем контролю несуть корисну інформацію, не можна залишити поза увагою, адже уже ясно, що в проаналізованому випадку вони несуть інформацію про динаміку процесів енерговиділення в реакторі. Якщо взяти до уваги, що це сигнали, які отримуються регулярно штатними системами контролю і не потребують додаткового обладнання для їх отримання, то можна замість стендових експериментів запропонувати тотальний аналіз флуктуацій сигналів від усіх систем внутрішньореакторного контролю при контрольованих змінах технологічного режиму роботи реактора. Очевидно, що такі зміни викличуть зміни в сигналах як описаних у даній статті, так і в інших, і можна буде прив'язати такі зміни до змін технологічного режиму.

Автори вдячні С.М. Стаднику за допомогу в підготовці рисунків.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. А.Д. Скорбун, С.М. Стадник, В.Г. Котеленець. Статистичний аналіз шумів реакторного обладнання на основі теорії гіпервипадкових явищ // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2016, в. 26, с. 36-43.
2. А.Д. Скорбун, С.М. Стадник, В.Г. Котеленець, Д.В. Салов. Застосування теорії гіпервипадкових явищ та кореляційного аналізу для аналізу шумів реакторного обладнання // *Ядерна енергетика та довкілля*. 2016, в. 8, с. 34-38.
3. А.Д. Скорбун, С.М. Стадник, В.Г. Котеленець, А.В. Дробецький. Закономірності в шумах реакторного обладнання // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2017, в. 28, с. 10-16.
4. Н.М. Астафьева. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *УФН*. 1996, т. 166, №11, с. 1145-1170.

Статья поступила в редакцию 12.09.2017 г.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФЛУКТУАЦИЙ СИГНАЛОВ ШТАТНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ВВЭР-1000

А.Д. Скорбун, В.Г. Котеленець, А.В. Дробецький

Проанализирована динамика флуктуаций сигналов от блоков детектирования потока нейтронов (БДПН), которые контролируют плотность нейтронного потока в активной зоне реактора. Анализируемые сигналы представляют собой длинные временные ряды данных, которые получают в процессе непрерывного контроля за состоянием оборудования атомной станции штатными системами контроля и при работе на мощности реакторной установки ВВЭР-1000 в стационарном режиме. С использованием вейвлет-анализа показано, что в флуктуациях этих сигналов не просто наблюдаются периодические явления, они отображают динамику нейтронного поля работающего реактора. Таким образом, однозначно показано, что флуктуации сигналов от БДПН не являются случайным шумом, а в действительности являются полезной составляющей общего сигнала, отображающей динамику процессов, которые контролируются данным блоком детектирования.

ANALYSIS OF FLUCTUATIONS DYNAMICS OF SIGNALS OF PWR-1000 IN-PILE NEUTRON FLUX CONTROL SYSTEM

A.D. Skorbun, V.G. Kotelenets, A.V. Drobetskii

Dynamics of the signals fluctuations from neutron flux detecting units (NFDU), which control neutron flux density in a reactor core, have been analyzed. The analyzed signals were long time sets of data, which are received in the process of continuous control of the state of the nuclear power plant equipment with the design in-pile control systems, and which were received during the work for power production of the reactor plant PWR-1000 in a steady state regime. Using a wavelet analysis it was show, that in the fluctuations of these signals not only the periodic phenomena are observed, but that these phenomena reflect the dynamics of the neutron field of the working reactor. Thus it is unambiguously shown, that fluctuations of the NFDU signals are not the random noise, but that as a matter of fact they are a useful component of the general signal, which reflect the dynamics of the processes, which are controlled with the given detecting unit.