

А. Д. Скорбун<sup>1</sup>, С. М. Стадник<sup>1</sup>, В. Г. Котеленець<sup>2</sup>, А. В. Дробецький<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

<sup>2</sup> Відокремлений підрозділ «Южно-Українська АЕС» Державного підприємства «НАЕК «Енергоатом», Миколаївська обл., Южноукраїнськ

## ЗАКОНОМІРНОСТІ В ШУМАХ РЕАКТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

Показано, що звичайний шумовий сигнал з того чи іншого контрольно-вимірювального приладу системи контролю за технологічним обладнанням першого або другого контурів АЕС (який не перевищує контрольні рівні і вважається таким, що свідчить про нормальний стан функціонування тієї чи іншої системи) може містити також інформацію щодо експлуатаційних режимів роботи цього обладнання: штатна робота агрегатів, режим перевантаження тощо. Проаналізовано ряди регулярних вимірювань деяких технологічних параметрів реакторної установки типу ВВЕР, які контролюються штатними системами контролю, на наявність у них періодичностей. Виявлено, що періодичні процеси спостерігаються в даних, пов'язаних як з першим, так і з другим технологічними контурами. Показано, що параметри, які підлягали аналізу, мають чітко виражені періодичності в області низьких частот при неперевищенні контрольних рівнів, що може бути використано в якості додаткової інформації при поглибленому аналізі експлуатаційних режимів роботи обладнання реакторної установки, а також складових (елементів) системи контролю за технологічними параметрами реакторної установки. Пошук періодичностей проводився із застосуванням вейвлет-аналізу, перетворення Фур'є та прийомів автокореляційного аналізу.

*Ключові слова:* параметри реакторної установки, довгі ряди вимірювань, інформація у шумовому сигналі.

### Вступ

Сучасні технології дозволяють не тільки вести постійний контроль за технологічними процесами, що відбуваються на такому об'єкті, як реакторна установка, але й накопичувати результати таких довготривалих вимірювань для подальшого їхнього аналізу та обробки. Це дає можливість проведення поглибленого статистичного аналізу з метою пошуку явищ, які не проявляються на коротких вибірках.

Зазвичай дуже незначні зміни сигналів, що надходять від контрольно-вимірювальних приладів у процесі штатної роботи обладнання розглядаються як шум, який у операторів не викликає інтересу доти, доки зміни не перевищать контрольного рівня. У роботах [1, 2] було досліджено, що статистичні властивості флуктуацій параметрів гарячої петлі першого контуру далекі від випадкових, мають ознаки гіпервипадковості [3] та взаємопов'язані між собою, що означає наявність впливу не завжди однозначно визначених зовнішніх факторів. Припускаючи, що таким чинником може бути періодичний процес, наприклад вплив напруги електроживлення з частотою 50 Гц, або інші фізичні процеси, у даній роботі було проведено поглиблений статистичний аналіз сигналів деяких параметрів контролю обладнання реакторної установки з метою пошуку в них закономірностей.

Звичайно, поява певних періодичних процесів при роботі реакторної установки є очевидним і відомим явищем, викликаним, наприклад, роботою систем регулювання, взаємовпливом обладнання через робоче середовище, режимними процесами виробництва електроенергії, технологічними перемиканнями, роботою насосів чи турбін [4]. Можливий також прояв ефектів періодичності як результат поступової деградації або часткового виходу з ладу технологічного обладнання [5], прояви підвищеної вібрації, викликані виникненням кавітаційних процесів та ін. Проте такі ефекти контролюються спеціалізованими контрольно-вимірювальними приладами, ми ж розглядаємо можливість пошуку корисної інформації (періодичностей та взаємозв'язків) у шумових компонентах сигналів від будь-яких контрольно-вимірювальних приладів штатних систем контролю АЕС.

У даній роботі аналізуються ті ж самі дані, які у роботі [2] проаналізовано на гіпервипадковість і серед яких було виявлено взаємозалежні.

Для пошуку прихованих закономірностей у досліджуваних даних, що на перший погляд є випадковими, використовувався вейвлет-аналіз як один із потужних методів пошуку періодичностей. Паралельно були використані перетворення Фур'є та кореляційний підхід.

© А. Д. Скорбун, С. М. Стадник, В. Г. Котеленець, А. В. Дробецький, 2017

### Опис експериментальних даних

Для аналізу використовувалися регулярні ряди даних, отримані шляхом реєстрації значень досліджуваних параметрів із періодичністю приблизно 0,5 с і загальною тривалістю 10 хв.

Досліджувалися параметри таких точок вимірювань:

RL71P01 – тиск живильної води до парогенератора;

YA10P18 – перепад тиску теплоносія на головному циркуляційному насосі 1;

YB10L11 – рівень котлової води в парогенераторі 1;

YP10L01 – рівень теплоносія в компенсаторі тиску.

Місце розташування датчиків показано на рис. 1.

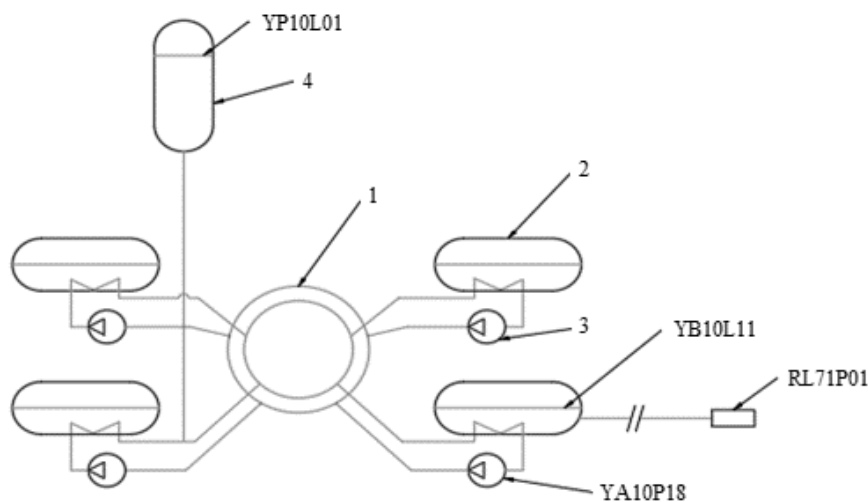


Рис. 1. Місце розташування датчиків на принциповій схемі: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – головний циркуляційний насос; 4 – компенсатор тиску.

У роботі [2] було показано, що за статистичними властивостями ці параметри поділяються на дві групи: у YA10P18 та YB10L11 виявлено ознаки гіпервипадковості та взаємозалежності, тоді як статистичні характеристики двох інших вибірок (RL71P01 та YP10L01) таких властивостей не мають і порівняно з першими можуть вважатися породженими випадковими процесами.

### Опис експерименту та результати аналізу

**Вейвлет-аналіз.** Як відомо [6], вейвлет-перетворення можна розглядати за аналогією з перетворенням Фур'є як розклад деякої функції за обмеженими (на відміну від нескінченних синусоїд Фур'є) функціями – так званими вейвлетами. Результатом вейвлет-перетворення є деякі коефіцієнти, що характеризують ступінь кореляції між вейвлетом і вибраною ділянкою функції, яка аналізується. Скануючи функцію по всій довжині вейвлетами різного масштабу (періоду), можна отримати двовимірну таблицю коефіцієнтів. При наявності у функції, яка аналізується, у деякий проміжок часу модуляції, наприклад синусоїдою, у таблиці вейвлет-перетворення будуть максимальні коефіцієнти для вейвлетів, масштаб (період) яких буде збігатися з періодом модулюючої функції. Таким способом, на відміну від перетворення Фур'є, можна побачити не тільки наявність деяких частот (періодичності), а й моменти часу, коли такий модулюючий сигнал був присутнім.

Результати вейвлет-перетворення часового ряду вимірювань для YA10P18 – перепаду тиску теплоносія на головному циркуляційному насосі 1 – показано на рис. 2, а; на рис. 2, б паралельно показано результати перетворення Фур'є. На рис. 2, а на верхньому графіку представлено дані, які аналізуються; двовимірною картиною з серією плям – графічне представлення коефіцієнтів вейвлет-перетворення. По горизонталі відкладено послідовний номер вимірювання, кожному з яких відповідає інтервал у 0,5 с. Тобто реальний час моменту вимірювання від початку графіка отримується множенням значення осі абсцис на 0,5 с; праворуч від двовимірної картини показано графік середнього значення коефіцієнтів для даного масштабу. Пік на цьому графіку означає, що на даному масштабі (періоді) вейвлета спостерігається періодичність (підвищені значення коефіцієнтів розкладу).

Використаний для аналізу вейвлет Гаусса однаково відображає як максимуми, так і мінімуми функції і для нього закономірно розташовані плями означають, що в аналізованій функції наявні періодичності з напівперіодом, рівним відстані між плямами по горизонталі.

Таким чином, застосування вейвлет-аналізу до досліджуваного часового ряду дозволило виявити область періодичних явищ. Ці особливості (серія плям на відстанях приблизно 85 - 100 елементів по довжині вибірки в часі) відповідають процесу з частотою приблизно 0,01 Гц, який проявляється і при розкладі у ряд Фур'є (див. рис. 2, б). Дещо нерівномірний розкид плям по двовимірній картині, що свідчить про присутність деякої аперіодичності, також узгоджується з тим, що пік для частоти 0,01 Гц на рис. 2, б є досить широким.

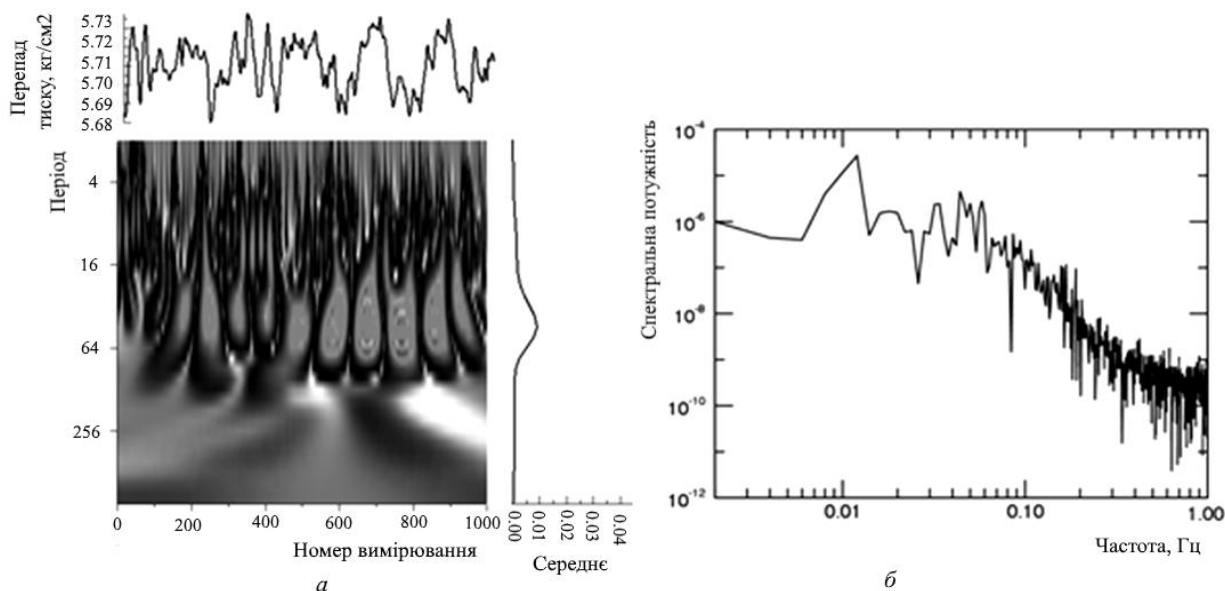


Рис. 2. Результати вейвлет-перетворення (вейвлет Гаусса 2-го порядку) для перепаду тиску теплоносія на головному циркуляційному насосі 1 (а); перетворення Фур'є (б).

**Кореляційний аналіз.** На верхньому графіку рис. 2, а видно, що існує деяка повторюваність ряду розміром приблизно 150 елементів, яка не проявилася на картині вейвлет-розкладу. З рис. 2, б видно, що крім виявленої періодичності у 0,01 Гц у вихідних даних присутні також більш високочастотні компоненти, у тому числі досить помітні частоти в області  $0,02 \div 0,05$  Гц. Для пошуку таких частот було використано такий прийом. З вихідного ряду береться "вікно", скажімо, перші  $n$  елементів. Зміщуючись на один елемент, ковзним шляхом проходимо по всій довжині ряду, при кожному зміщенні розраховується коефіцієнт кореляції між вибраним "вікном" і наступними  $n$  елементами. При цьому вихідний ряд перетворюється на ряд коефіцієнтів кореляції, який і буде предметом подальших досліджень. Така процедура призводить до згладжування високочастотних шумів та підкреслювання картин, які повторюються (якщо вони є), за рахунок кореляційного аналізу.

Даний підхід застосовувався для малого вікна  $n = 100$  елементів вибірки і великого вікна  $n = 400$  значень. При малому вікні можна спостерігати більш високочастотні закономірності – періодичності, при великому – більш довготривалі періодичності. Розміри вікна вибирались шляхом візуального перегляду графіків кореляцій, далі представлено найбільш інформативні, з погляду авторів, отримані результати.

Далі до новоутвореного ряду було застосовано описані вище вейвлет-аналіз та перетворення Фур'є. На рис. 3, а показано результати вейвлет-аналізу, на якому явно виражено дві періодичності: виявлена в попередньому аналізі (див. рис 2, а) на масштабі 35, додаткова періодичність на масштабі 8. Таким чином, вдалося висвітлити ще одну періодичність, яка у вихідному ряді була прихована. На рис. 3, б показано розклад у ряд Фур'є, що доповнює картину, – частоти в області 0,02 - 0,05 Гц проявилися значно більш чітко. Відзначимо також появу, точніше, більш чіткий прояв смуги частот в області 0,08 - 0,1 Гц.

Кореляційний ряд, утворений вікном в 400 елементів ряду, буде більш згладженим, тобто всі високочастотні закономірності та зашумленість зникають, залишаться тільки низькочастотні періодичності, які були виявлені на рис. 2.

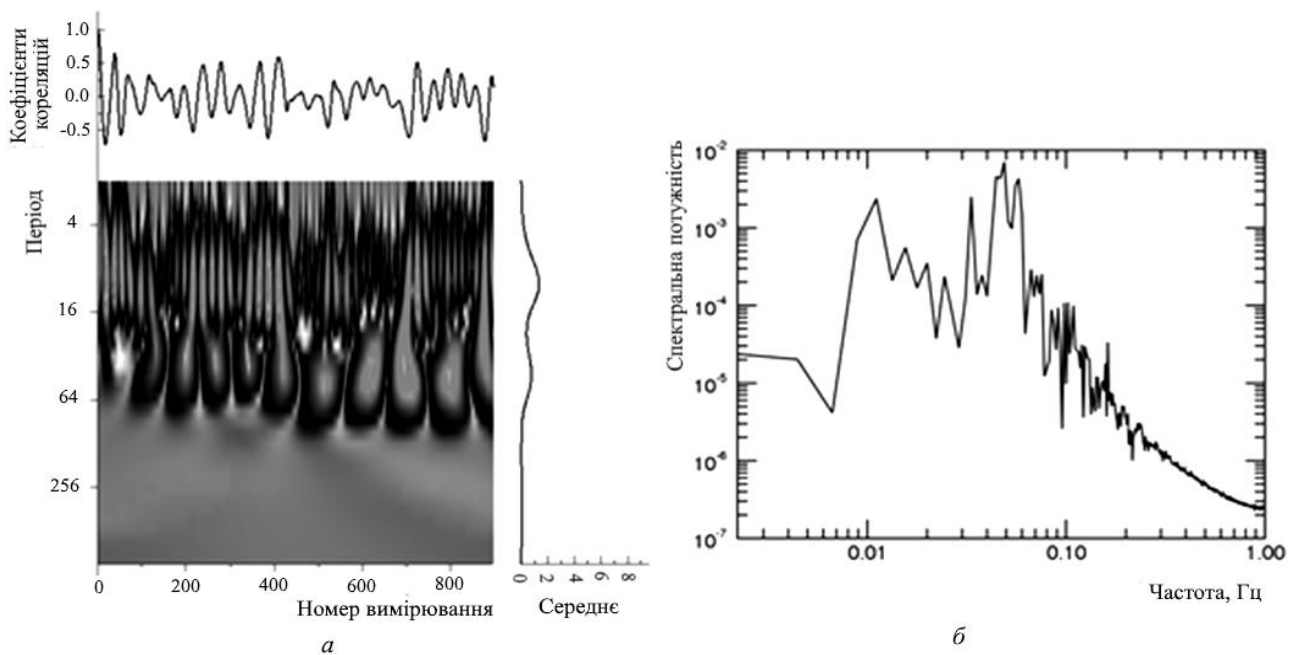


Рис. 3. Результати аналізу новоутвореного кореляційного ряду з вікном  $n = 100$ : вейвлет-перетворення (вейвлет МНАТ) (а); перетворення Фур'є (б).

Аналогічний аналіз було проведено для всіх інших указаних вище технологічних параметрів. Для прикладу на рис. 4 представлено графіки для тиску живильної води парогенератора. Для цього параметра за теорією гіпервипадкових явищ виявити внутрішні особливості не вдалося, хоча періодичні процеси на вейвлет-картинах видно досить чітко.

**Автокореляційний аналіз.** Оскільки при застосуванні вейлет-аналізу та розкладу в ряд Фур'є проявилися деякі закономірності в наших регулярних рядах вимірювань, логічним стає провести автокореляційний аналіз, який покаже, наскільки помітним є зв'язок між сусідніми елементами вибірки. Графіки автокореляцій представлено на рис. 5. З рисунка видно, що всі автокореляційні графіки мають коливний характер, що є характерним для періодичних процесів. Зауважимо також, що розміри «вікна», вибрані для описаного вище пошуку кореляцій і згладжування, приблизно відповідають відстані між піками автокореляційної функції.

Проте слід підкреслити, що поведінка всіх чотирьох проаналізованих параметрів, хоч вони й різняться між собою (див. рис. 5), відрізняється від поведінки випадкових модельних рядів, автокореляційна функція яких таких особливостей не має зовсім.

### Обговорення та висновки

Усі досліджувані параметри мають внутрішні закономірності в області низьких частот, проте розділити їх на групи за допомогою вейвлет-аналізу та використання розкладу в ряд Фур'є не вдалося.

Висновок про те, що статистичні характеристики деяких контрольованих параметрів відрізняються від таких для інших параметрів, добре видно на рис. 5, де графіки попарно поділяються на дві групи. Прояви взаємозалежності елементів ряду для RL71P01 та YP10L01 (підйоми на графіках в районі затримки ( $\text{lag}$ )  $\sim 150$ ) набагато менші порівняно з такими для вибірок YA10P18 та YB10L11. Цей результат узгоджується також із результатами роботи [1, 2], де аналогічний висновок стосовно поділу даних на дві групи за статистичними властивостями зроблено на основі проявів так званих гіпервипадкових властивостей у проаналізованих вибірках.

Основний результат роботи – у флуктуаціях контрольованих параметрів, які записані контрольною апаратурою у штатному режимі роботи, виявлено прояви низькочастотних періодичностей, у даному варіанті на частотах близько 0,01, 0,03 ÷ 0,05, та 0,08 ÷ 0,1 Гц. Цей результат вдалося отримати шляхом комплексного використання кількох методів: вейвлет-аналізу, розкладу у ряд Фур'є та кореляційних методів, які доповнюють один одного, що дало змогу надійно встановити цей ефект.

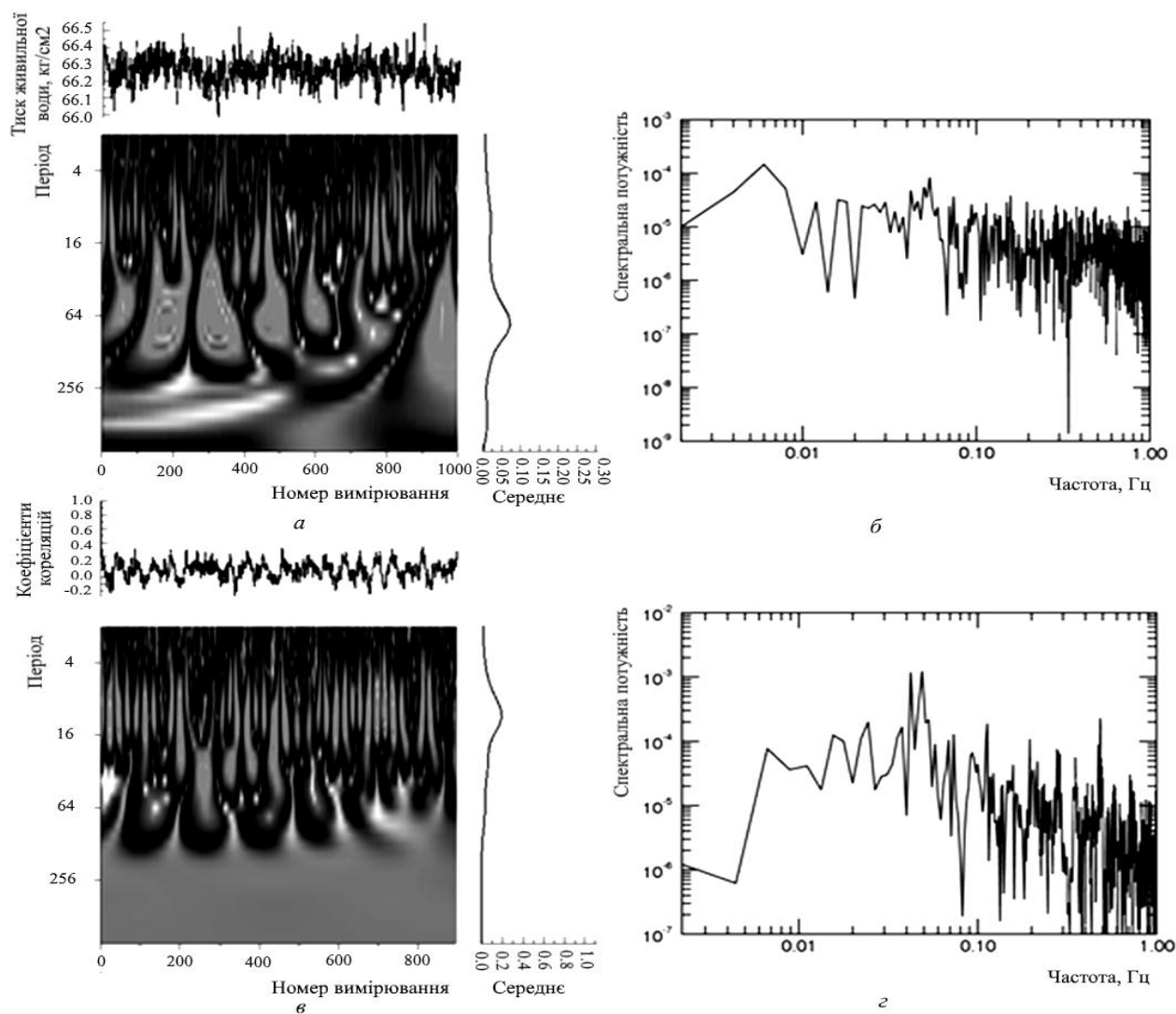


Рис. 4. Результати вейвлет-перетворення (вейвлета Гаусса 2-го порядку) для тиску живильної води парогенератора (а), перетворення Фур'є (б) та результати аналізу новоутвореного кореляційного ряду з вікном  $n = 100$ : вейвлет-перетворення (вейвлет Гаусса 2-го порядку) (в), перетворення Фур'є (г).

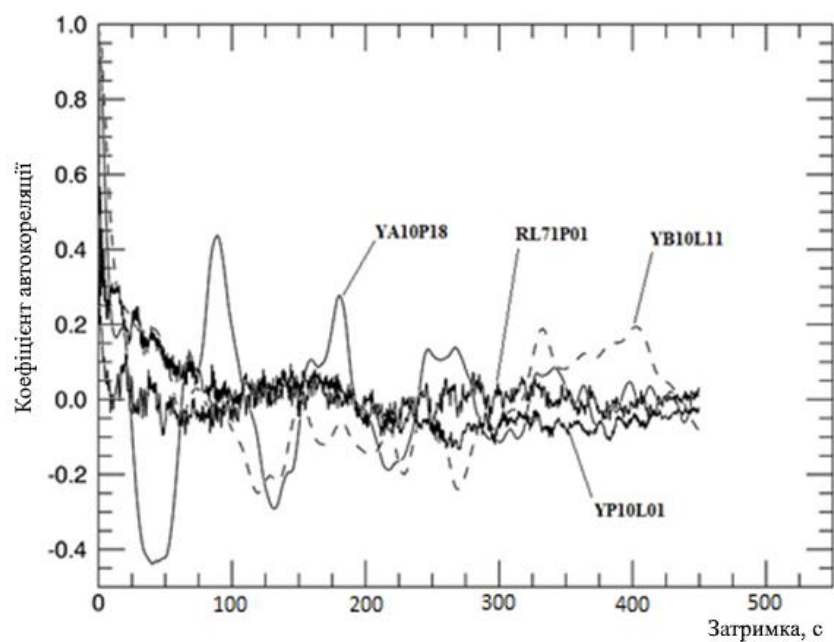


Рис. 5. Порівняльний аналіз автокореляційних функцій досліджуваних параметрів.

Помічені низькочастотні періодичності відрізняються від раніше описаних [5], де основна увага приділяється частотам вище 0,1 Гц, виявленим при використанні спеціального обладнання.

Раніше у нашій роботі [2] шляхом аналізу попарних кореляцій було виявлено взаємозалежність між (шумовими) даними YA10P18 та YB10L11. З урахуванням досліджень і результатів даної роботи можна вважати доведеним, що флуктуації параметрів, які контролюються штатними системами контролю (і величини яких не перевищують контрольних рівнів), містять корисну інформацію і можуть бути використані при аналізі роботи технологічного обладнання реакторної установки (особливо при поглибленому аналізі як штатної, так і нештатної її роботи), а також складових (елементів) систем контролю технологічних процесів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Скорбун А.Д., Стадник С.М., Котеленець В.Г. Статистичний аналіз шумів реакторного обладнання на основі теорії гіпервипадкових явищ // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2016. – Вип. 26. – С. 36 - 43.
2. Скорбун А.Д., Стадник С.М., Котеленець В.Г., Салов Д.В. Застосування теорії гіпервипадкових явищ та кореляційного аналізу для аналізу шумів реакторного обладнання // Ядерна енергетика та довкілля. – 2016. – Вип. 8. – С. 34 - 38.
3. Горбань И.И. Статистическая неустойчивость физических процессов // Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 9. – С. 40 - 52.
4. Скалозубов В.И., Билей Д.В., Габлая Т.В. и др. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 512 с.
5. Ключников А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М. и др. Теплофизика поврежденной реакторных установок. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2013. – 528 с.
6. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. - 1996. - Т. 166, № 11. - С. 1145 – 1170.

**А. Д. Скорбун<sup>1</sup>, С. М. Стадник<sup>1</sup>, В. Г. Котеленець<sup>2</sup>, А. В. Дробецкий<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Україна

<sup>2</sup>Обособленное подразделение «Южно-Украинская АЭС» Государственного предприятия «НАЭК «Энергоатом», Николаевская обл., Южноукраинск, Украина

#### ЗАКОНОМІРНОСТІ В ШУМАХ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Показано, что обычный шумовой сигнал от того или иного контрольно-измерительного прибора системы контроля технологического оборудования первого или второго контуров АЭС (который не превышает контрольные уровни и считается таким, который свидетельствует о нормальном состоянии функционирования той или иной системы) может содержать также информацию об эксплуатационных режимах работы этого оборудования: штатная работа агрегатов, режим перезагрузки и т.п. Проанализированы ряды регулярных изменений некоторых технологических параметров реакторной установки типа ВВЭР, которые контролируются штатными системами контроля, на наличие у них периодичностей. Выявлено, что периодические процессы наблюдаются в данных, связанных как с первым, так и со вторым технологическими контурами. Показано, что параметры, которые подлежали анализу, имеют четко выраженные периодичности в области низких частот при непревышении ими контрольных уровней, что может быть использовано в качестве дополнительной информации при углубленном анализе эксплуатационных режимов работы оборудования реакторной установки, а также составляющих (элементов) системы контроля технологических параметров реакторной установки. Поиск периодичностей проводился с применением вейвлет-анализа, преобразования Фурье и приемов корреляционного анализа.

*Ключевые слова:* параметры реакторной установки, длинные ряды измерений, информация в шумовом сигнале.

**A. D. Skorbun<sup>1</sup>, S. M. Stadnyk<sup>1</sup>, V. G. Kotelenets<sup>2</sup>, F. V. Drobetskyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

<sup>2</sup>Separated department «South-Ukraine NPP» of the state enterprise «NNEGG «Energoatom», Mikolaiv oblast, Yuzh-noukrainsk, Ukraine

#### REGULARITIES ARE IN NOISES OF REACTOR EQUIPMENT

It was shown, that a usual noise signal from that or another control device of the system of control for technological equipment of the first or second contour of NPP (which do not exceeds the control levels and they believe it testify about normal functioning of that or another system) can contain also an information about working operating

conditions of that equipment; normal work of the aggregates, overload conditions, etc. The sets of regular measurements of some technological parameters of WWR type reactor facility, which are controlled by standard control systems, have been analyzed for existence of periodicities. It was revealed, that the periodical processes are observed in the data, which are connected either with the first or with the second technological contours. It have been shown, that parameters, which were analyzed, have clear expressed periodicities in the region of low frequencies (without exceeding the control levels). This can be used as additional information at in-depth analyzing of the operating regimes of work of the reactor facility equipment, and also the elements of the systems of control for technological parameters of the reactor facility. The search of periodicities was carried out with use wavelet analysis, Fourier transform and autocorrelation analysis.

*Keywords:* parameters of the reactor setting, long rows of measuring, information is in a noise signal.

#### REFERENCES

1. *Skorbun A.D., Stadnyk S.M., Kotelenets V.G.* Statistical analysis of noises of reactor equipment on the base of hyper-random phenomena theory // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2016. – Iss. 26. – P. 36 - 43. (Ukr)
2. *Skorbun A.D., Stadnyk S.M., Kotelenets V.G., Salov D.V.* Use of the theory of hyper-random phenomena and correlation analysis for noise diagnostics of reactor equipment // Yaderna energetyka ta dovkillya (Nuclear Power and The Environment). – 2016. – Iss. 8. – P. 34 - 38. (Ukr)
3. *Gorban I.I.* Statistical instability of physical processes // Radioelektronika. – 2011. –Vol. 54, No. 9. – P. 40 - 52. (Rus).
4. *Skalozubov V.I., Biley D.V., Gablaya T.V. et al.* Development and optimization of the control systems for nuclear power plants with PWR. – Chornobyl: In-t for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 2008. – 512 c. (Rus)
5. *luchnikov A.A., Sharaevsky I. G., Fialko N.M. et al.* Thermal physics of damages of reactor facilities Teplofizika povrezhdenij reaktornyh ustanovok. – Chornobyl: In-t for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 2013. – 528 p. (Rus)
6. *Astafieva N.M.* Wavelet-analysis: The bases of the theory and the examples of application // Uspekhi fizicheskikh nauk. - 1996. - Vol. 166, No. 11. - P. 1145 – 1170. (Rus)

Надійшла 02.03.2017  
Received 02.03.2017