

## Особливості статистичної обробки спостережень циклічних процесів в електроенергетиці з використанням імітаційного моделювання

*Розглядається проблема статистичної обробки циклічних процесів, які супроводжують роботу енергоагрегатів. Для оцінки параметрів циклічності вимірюваних процесів використано ідею стаціонаризації та методи імітаційного моделювання. Достовірність точності виміру інформаційних сигналів забезпечується використанням класу субгауссових випадкових процесів.*

*Рассматривается проблема статистической обработки циклических процессов, которые сопровождают работу энергоагрегатов. Для оценки параметров цикличности измеряемых процессов использована идея стационаризации и методы имитационного моделирования. Достоверность точности измерений информационных сигналов обеспечивается использованием класса субгауссовых процессов.*

**Вступ.** Як відомо [1, 6, 8, 10], при використанні методів математичної статистики обробки результатів спостережень головною роллю відіграє вибір та глибина обґрунтування математичної моделі фізичних процесів, що обробляються.

При діагностуванні різноманітних типів електроенергетичних машин сигнали, що надходять з давачів, які встановлені на різних механічних вузлах, як правило, носять циклічний характер [5]. Зупинимося на термінології щодо визначення циклічності, періодичності та ритмічності процесів.

Циклічний процес — це визначення фізичного явища і стосується того випадку, коли з точки зору фізики та механіки і характеру руху можна говорити про повторюваність характеристик сигналів.

Поняття ритмічності вживається тоді, коли спостерігається два фізичних процеси, один з яких має характер циклічності, близький до другого. Тоді ці два процеси називають ритмічними. Наприклад, різні коливання, викликані одне одним або такі, що відбуваються одне в залежності від іншого, пов'язаного з ним.

Періодичні процеси або функції — поняття чисто математичні, абстрактні і вживаються при побудові різних математичних моделей реальних циклічних або ритмічних процесів [9].

Крім цього розрізняють фізичні та математичні процеси [12]. Циклічний процес, як було зазначено вище, — це фізичний процес і тому термінологія при його використанні є фізичною або технічною, яка не завжди співпадає з математичною. Слід зауважити, що у фізиці велику роль відіграють саме ритмічні процеси, про які йшлося вище. Таким чином при подальшому викладенні матеріалу під фізичними моделями циклічних та ритмічних процесів будемо мати на увазі моделі процесів, яким притаманна фізична термінологія.

Як відомо [1, 10], розрізняють класи детер-

мінованих та стохастичних процесів. Слід зауважити, що детермінований процес можна розглядати в розширеному плані як частинний випадок стохастичних моделей. Це зручно в тому випадку, коли випадковий процес розглядається з урахуванням його еволюції, при якій дисперсія процесу зменшується до нуля. Апарат, за допомогою якого досліджується такий процес виродження, пов'язаний з розглядом різного роду нерівностей, в які входить дисперсія випадкового процесу, що вироджується. Найбільш широко вживаною при такому практичному дослідженні є нерівність Чебишева та численні її різновиди [9]. Зокрема в роботах [6, 7] показано, що існують випадки, коли можна використовувати різновид перівності Чебишева, а саме коли розглядаються субгауссові процеси  $Sub(\Omega)$ . При обробці результатів вимірювання та при застосуванні методу перевірки стохастичних гіпотез моделі субгауссових розподілів дозволяє покращити оцінки точності у порівнянні з класичною нерівністю Чебишева [6, 7, 9].

**Мета роботи та постановка задачі.** Ставиться задача створення методики для стохастичної обробки циклічних процесів, які супроводжують роботу енергоагрегатів з урахуванням циклічності та її оцінки з використанням методу стаціонаризації та методів імітаційного моделювання. Коротко розглянемо питання про теоретичне обґрунтування методу стаціонаризації, який використовується в техніці при обробці реалізацій нестационарних (в фізичному розумінні) випадкових процесів. Серед таких процесів можна відзначити циклічні процеси, які останнім часом набули досить широкого використання.

Перший широко вживаний спосіб стаціонаризації [1] — це широке використання методу компромісного вибору "короткого" інтервалу стаціонарності в нестационарних процесах і формування ви-

бірки на цих "коротких" інтервалах стаціонарності, що обробляється по реалізаціях стаціонарних процесів. При цьому виникає проблема вибору довжини "інтервалу стаціонаризації". Теоретично в ряді випадків такий інтервал не існує. Крім того, чим він коротший, тим менше даних, і при обробці не можна підвищити точність. Якщо ж його розширювати, щоб отримати більше даних, то одержимо нові дані, які не вписуються в модель стаціонарності. Таким чином, не існує оптимального інтервалу стаціонарності. Тому на сьогодні в загальному вигляді задача стаціонаризації задовільного розв'язку не має. Розв'язати цю проблему можна наступним чином: використати моделі, в будові яких є вкладені стаціонарні процеси або вкладені спектри [14]. Вкладені спектри використовують в моделях випадкових процесів з періодично корельованими функціями [8], які не обов'язково є періодичними процесами, але завдяки певній спектральній будові мають спектральну структуру, при якій в певних смугах шляхом фільтрації можна виділяти стаціонарні компоненти.

Другий спосіб — це використання математичних моделей періодичних випадкових процесів для опису реальних фізичних циклічних процесів. Для досягнення поставленої мети, пов'язаної зі створенням методів стохастичної обробки вібрацій, що зареєстровані на реальному енергоагрегаті з урахуванням особливості роботи роторних машин, а саме циклічності процесів, що супроводжують їхню роботу, будемо використовувати другий спосіб.

Слід зауважити, що питання моделювання детально розглядалося у роботі [5], і ця стаття базується на наведених в ній теорії, тому теоретичні викладки будуть подані тут стисло.

**Особливості отримання експериментальних даних для вібродіагностики енергоагрегатів.** Розглянемо питання одержання експериментальних даних — реалізацій процесу вібрацій, які вимірювались на різних вузлах реального вітроагрегату USW 56-100 (підшипникові вузли вала вітроколеса і генератора, а також на корпусі редуктора). Саме вібросигнали, що зареєстровані на цих вузлах, є найбільш інформативними з точки зору діагностики технічного стану вітроагрегату [13]. За результатами дослідження зареєстрованих вібросигналів робляться діагностичні висновки, а тому зрозуміло, що питання точності та достовірності отримання і попередньої обробки результатів вимірювання таких процесів лежать в основі забезпечення достовірного діагностування всього енергоагрегату.

Вимірювання вібраційних сигналів здійснюється при прокрутці вітротурбіни генератором, який працював у режимі двигуна. При проведенні випробувань вітроагрегату високообертовий вал генератора обертався з середньою кутовою швидкістю 24,8 об/с.

Для виміру, реєстрації та обробки вібраційних сигналів було використано лабораторний зразок інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), який

докладно розглянуто в [15]. Узагальнена схема з'єднання елементів лабораторного зразка ІВС показана на рис. 1. Як датчик використовувався акселерометр АВС-017, який найбільш придатний для проведення вібродіагностики вітроагрегатів [13].

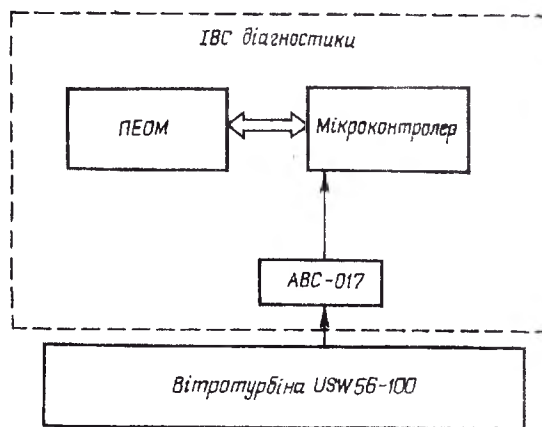


Рис. 1

При проведенні експериментальних досліджень важливим моментом є вибір місця розташування і орієнтації датчиків по відношенню до вузлів, що обертаються. Згідно з ГОСТ 12379-79, акселерометри при вимірюванні віброприскорення мають бути розташовані в радіальному або в осьовому напрямку по відношенню до обертових вузлів. В нашому випадку акселерометр АВС-017 був розташований на підшипниковому вузлі високообертового вала.

Електричний сигнал з виходу АВС-017 поступав на мікроконтролер і далі на плату АЦП, а з виходу АЦП оцифрований сигнал надходив до оперативної пам'яті ПЕОМ.

Коротко зупинимося на деяких питаннях, пов'язаних з дискретизацією і попередньою обробкою вібраційних сигналів, що вимірюються. Період дискретизації вимірюваних аналогових сигналів становив  $\Delta t = 64 \cdot 10^{-6}$  с, а об'єм вибірки складав  $N = 16000$  відліків, які оброблялися у відповідних програмах з проріджуванням, що становило 25 періодів. Одну із типових реалізацій дослідженого процесу  $\xi_t$  показано на рис. 2. На виході АЦП сигнали центрувалися самим приладом, що давало можливість розглядати випадкові завади як субгауссові. Сигнал оброблявся наступним чином: з використанням спеціально створеної програми формувалися матриці фі-серій і за їхньою допомогою вираховувався тренд [11]. На цьому експеримент закінчувався. Далі на основі гармонічного аналізу з використанням перегворення Фур'є знаходилися основні гармоніки тренда, причому вважалось, що тренд є процесом, який змінюється дуже повільно і до нього застосовують звичайний гармонічний аналіз. Виділялись гармоніки, потужність яких в сумі давала не менше 90% потужності сигналу,

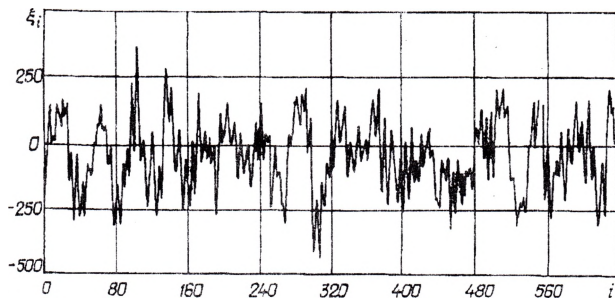


Рис. 2

який ми мали на початку експерименту. Потім методом, описаним в [11], з використанням оцінених експериментальним шляхом гармонік і моделі субгауссової завади  $\sigma_{0,01}$  та  $\sigma_{0,05}$  створювали модель процесу, що оброблявся за цією методикою. Тренд змодельованого процесу  $v_k$  та тренд заміряного процесу  $\xi_k$  виводилися на спільний графік (рис. 3).

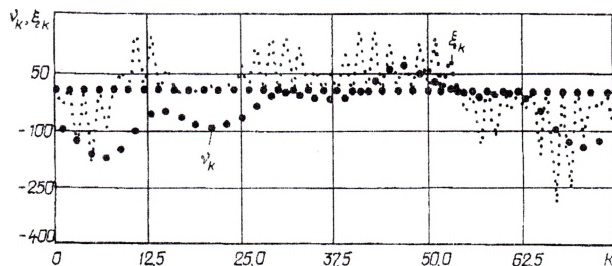


Рис. 3

Таким чином, за результатами аналого-цифрового перетворення вібраційного сигналу, виміряного на підшипниковому вузлі високообертового валу (швидкість обертання  $n=24,8$  об/с), одержуємо вибірку з наступними параметрами:

$$T_{\text{ц}} = 1/24,8 = 0,041 \text{ с} \text{ — період циклу;}$$

$$h_{\text{ц}} = 0,041/\Delta t = 0,041/64 \cdot 10^{-6} = 640,625 \text{ — кількість відліків на цикл;}$$

$$N/640,625 = 16000/640,625 = 24,976 \text{ — кількість циклів.}$$

Дані, отримані на виході з АЦП (без проріджування), мали параметри:

$$\Delta t \cdot N/T = 24,878 \text{ — кількість циклів в зареєстрованій реалізації;}$$

$$\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \xi_j = -63,108 \text{ — середнє арифметичне відліків реалізації.}$$

Наведену на рис. 2 типову реалізацію виміряного процесу було побудовано з використанням комп'ютерної лінійної інтерполяції та реалізую-

чого її спеціального програмного забезпечення. У подальшому були використані наступні позначення:  $z=25$  — кількість періодів;  $h=640$  — кількість відліків на період;  $\Delta\varphi$  — крок всередині серій (в градусах або радіанах).

Обраховуємо величини:  $T = \Delta t \cdot h \Delta = 41 \cdot 10^{-3}$  с — період випадкового процесу, що досліджується в часових одиницях;  $\Delta t \cdot N = 1,02$  с — загальна тривалість вибірки вихідної реалізації.

**Моделювання реалізації циклічного процесу.** Математична модель прискорення в точці розміщення датчика була вибрана у вигляді суми детермінованого тригонометричного полінома та випадкової адитивної компоненти, як в роботі [5].

Стохастично періодичний процес, який часто виступає як математична модель циклічних чи ритмічних процесів, що використовуються при вивченні і проектуванні різних ІВС, в загальному випадку можна описати наступним виразом:

$$\xi(t) = Q(t) + \eta(t), \quad t \in T, \quad T \subset Z, \quad (1)$$

де  $T$  — дискретна множина моментів часу;  $Q(t)$  — детермінована  $T$ -періодична функція, а  $\eta(t)$  — періодичний випадковий процес;  $Z$  — множина цілих чисел.

**Перевірка якості моделювання.** Основною задачею будь-якого моделювання є методика перевірки якості отриманих результатів та технологія її використання. Згідно з [9] в даному випадку бажано починати з побудови матриці фі-серій для процесу, що моделюється, виходячи з отриманих вище реалізацій (рис. 2). Фі-серії та фі-матриці детально розглянуті в [11].

Нагадаємо, що матриця фі-серій отримується за допомогою виразу

$$\Phi = \{\xi_{k,j}^r, k \in \overline{0, r-1}, j \in \overline{0, z-1}\}, \quad (2)$$

де  $\xi_{k,j}^r$  — реалізація  $\xi_{k,j}$   $j$ -го елемента  $k$ -ої фі-серії;  $r$  — загальна кількість серій-рядків матриці фі-серій  $\Phi$ ;  $z$  — кількість періодів.

Використовуючи матрицю фі-серій, формується матриця-колонка  $v$  статичних оцінок математичних сподівань для кожної реалізації  $k$ -ої фі-серії

$$v = \{v_k, k \in \overline{0, r-1}\},$$

де потрібна точкова оцінка виду

$$v_k = \frac{1}{z} \sum_{j=0}^{z-1} \xi_{kj}^r. \quad (3)$$

для кожного елемента  $v_k$ .

Наведений на рис. 3 графік зміни у часі на періоді оцінки математичного сподівання (тренда)  $v_k$  при аналізі сигналу був отриманий з використан-



ням матриці фі-серій та детермінованої адитивної складової.

Виходячи з  $\Phi$ , будується матриця-колонка оцінок дисперсії елементів  $k$ -ої фі-серії

$$\left\{ \mu_k^2, k \in \overline{0, r-1} \right\},$$

елементи якої визначаються за формулою

$$\mu_k^2 = \frac{1}{r-2} \sum_{j=0}^{r-1} (\xi_{kj} - v_k)^2. \quad (4)$$

На рис. 4 показано графік (4) для матриці фі-серій (2).

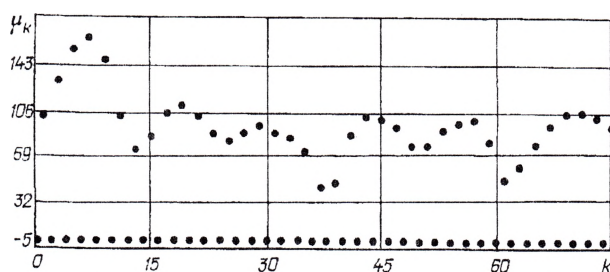


Рис. 4

Зупинимося на самій ідеї формування відповідних вибірок для процесів, що пов'язані з циклічністю, викликані обертями різних роторів і валів. Для цього розглянемо рис. 1, 2, 5. Згідно з рис. 1, сигнал надходить до мікроконтролеру і перетворюється за допомогою АЦП. Одержаний на виході мікроконтролеру сигнал описує графік зміни прискорення в радіальному напрямку високооборотного валу в залежності від часу. Таким чином спостерігається деяка реалізація періодичного інформаційного сигналу, що надходив на вхід АЦП від датчика. На рис. 2 показана одна з можливих таких реалізацій. Після перетворення аналогових реалізацій за допомогою АЦП отримуємо реалізації періодичного випадкового процесу з дискретним часом. Вони синхронізовані з фазами обертового руху, що показані на рис. 5.

На рис. 5 показано графік середніх значень фі-серій в полярних координатах за один оберт. На цьому графіку  $R_{\max}$  і  $R_{\min}$  означають максимальне і мінімальне значення елементів фі-серії для реалізації віброприскорення, що спостерігається.  $R(W)$  відповідає значенням  $v_k$ , що показані на рис. 3. Рис. 5 є аналогічним до рис. 3, але зображений не в прямокутній декартовій системі координат, а в полярній системі координат. Перехід до полярної системи координат має важливе значення, оскільки ми маємо справу з рухомими деталями енергоагрегату, тобто отримані та оброблені дані мають періодичний характер; тому набагато простіше використовувати для подальших обчислень в системі

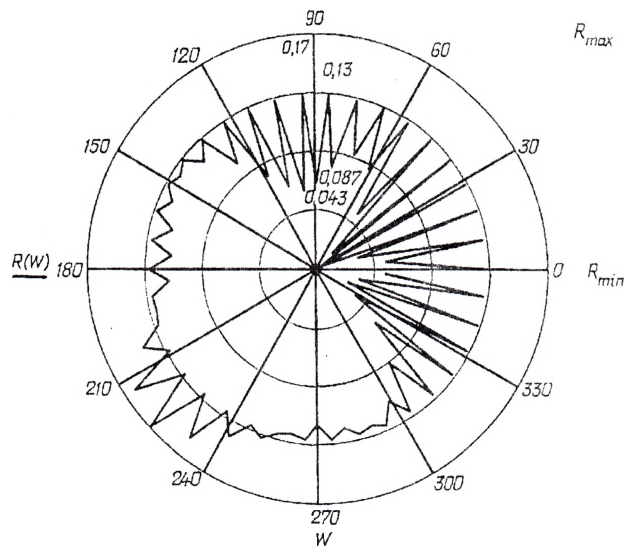


Рис. 5

"відстань і кут" [5, 12, 13]. Згаданий перехід від прямокутної до полярної системи координат здійснюється за спеціально розробленою програмою.

Перехід до полярної системи координат дає реальне наближення до об'єкту, який був розглянутий вище. Оскільки в роботі при проведенні експерименту приділялася увага контролю обортових частин енергоагрегату (підшипникового вузла вітроенергоагрегату), то теоретична частина роботи теж була виконана з урахуванням можливості створення методики для стохастичної обробки циклічних процесів, які супроводжують роботу вітроенергоагрегатів з урахуванням циклічності та її оцінки на основі метода стаціонаризації та методів імітаційного моделювання. Тобто перехід від рис. 3 до рис. 5 є реальним наближенням до об'єкту спостереження. Як видно з рис. 5, максимальні (в середньому) значення віброприскорення спостерігаються у секторі від  $210^\circ$  до  $240^\circ$ . Згідно з [10], цей факт свідчить про можливу наявність дефектів в обортовому вузлі енергоагрегату. Прояв дефектів на відповідних кутах повороту обортових вузлів дає можливість підвищити достовірність їхньої діагностики. Крім того запропонований підхід може бути використаний при вирішенні задачі балансування обортових вузлів енергоагрегата.

**Висновки.** У роботі вперше використано субгауссовий процес при моделюванні і в задачах аналізу реальних сигналів електроенергетичного обладнання, що перебуває в стані обертового руху.

З використанням результатів імітаційного моделювання динаміки обортових вузлів енергоагрегатів розроблена методика, яка може бути застосована на практиці безпосередньо для контролю їх технічного стану. Крім того, застосування кутових спостережень, їхня індикація в полярній системі координат може бути використана для вирішення задачі діагностики, оскільки у запропонованому методі визначається кутовий напрям вектора, який

вказує на найбільш небезпечний напрямок розвитку дефекту.

1. *Бабак В.П., Марченко Б.Г., Фриз М.С.* Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика. — К.: Техніка, 2004. — 288 с.

2. *Гнеденко Б.В.* Курс теорії вероятностей. — М.: Гос.из-во физ.-мат.лит.-ры. 1961. — 406 с.

3. *Ермаков С.М., Михайлов Г.А.* Статистическое моделирование. — М.: Наука, 1982. — 296 с.

4. *Мардиа К.* Статистический анализ угловых наблюдений. Под ред. Большева Л.Н. — М.: Наука, 1978. — 240 с.

5. *Марченко Н.Б., Мислович М.В.* Моделивання матриці фі-серій та її використання при аналізі точності інформаційно-вимірювальних систем діагностики електроенергетичного обладнання // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 4. — С. 100—103.

6. *Марченко Н.Б.* Використання моделей субгаусівських процесів при моделюванні інформаційних сигналів // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2004. — Ч. 5. — С. 117—120.

7. *Марченко Н.Б.* Анализ точностных характеристик при моделировании линейных субгаусовых случайных процессов и их использование в информационно-измерительных системах // Электронное моделирование. — 2004. — Т. 26. — № 6. — С. 63—71.

8. *Марченко Б.Г., Приймак М.В.* Побудова моделі та аналіз стохастично періодичних навантажень енергосистем / Праці

Інституту електродинаміки НАН України. — 1999. — Вип. 1. — С. 129—153.

9. *Марченко Н.Б.* Про другий наслідок з нерівності Чебишева та його використання при оцінці точності вимірювань // Тези доп. V Міжн.наук.-тех.конф. "АВІА-2003". — Т. 1. — Київ: НАУ. — 2003. — С. 11.101-11.104.

10. *Марченко Б.Г., Мислович М.В.* Вибродіагностика подшипниковых узлов электрических машин. — Киев: Наук.думка, 1992. — 195 с.

11. *Марченко Н.Б.* Методи і алгоритми оцінювання точності інформаційно-вимірювальних систем діагностики на базі моделей субгаусових процесів / Автореферат на здоб. наук.ступ.канд.техн.наук. — К.: Ін-т електродинаміки НАН України. — 2005. — 19 с.

12. *Математическая энциклопедия* / Гл.ред. И.М.Винни-радов. — М.: Сов.энциклопедия, 1977. — Т. 4.

13. *Розробити ефективні методи дослідження електрофізичних процесів та полів електроенергетичного обладнання для підвищення його надійності, безпеки експлуатації та вибору нових проектних рішень* // Звіт про наук.-техн.роботу. — Київ: ІЕД НАНУ. — 2005. — 265 с.

14. *Ширяев А.Н.* Вероятность. — М.: Наука, 1980. — 576 с.

15. *Marchenko N., Myslovitch M., Sysak R.* Vibration Diagnostics of Wind-Driven Power Units with Usage of Statistical Expert System // Przegląd Elektrotechniczny. — Zakopane (Poland). — 2005. — № 2. — P. 53—57.

Надійшла 26.07.2006