

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ КОМПОНЕНТІВ БАГАТОРІВНЕВИХ ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗДРОТОВИХ БЛОКІВ ЗВ'ЯЗКУ

Ю.І. Гижко*, канд. техн. наук, **В.М. Зварич****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: zvaritch@gmail.com.

Розглянуто деякі особливості побудови елементів бездротових каналів зв'язку, що входять до складу багаторівневих інформаційно-вимірювальних систем діагностування електротехнічного обладнання. Розглянуто один з можливих варіантів побудови первинного вимірювального каналу, орієнтованого на використання бездротових вимірювальних сенсорів, які відповідають міжнародним стандартам. Коротко наведено опис можливих діагностичних ознак задля визначення технічного стану і класифікації можливих дефектів в окремих вузлах електротехнічного. Бібл. 21, рис. 1.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, система діагностики, лінійні AR процеси.

Вступ.

Оцінка надійності роботи електротехнічного обладнання приймає особливе значення в повоєнний період. Для надійної роботи електростанції важливе безперебійне функціонування не тільки її основного обладнання, але і обладнання власних потреб [1, 2]. Задля вирішення цієї проблеми необхідно мати надійні системи моніторингу та діагностики такого обладнання. Розробкою подібних систем займаються такі компанії як Brüel & Kjær, PCB, SPM, Bently Nevada [3], Timken [4], а також виробники крупного електротехнічного обладнання – Siemens, ABB та інш. [5, 6]. Зрозуміло, що в повоєнний час доцільно мати мобільні системи моніторингу та діагностики. Вони повинні давати можливість оперативної оцінки технічного стану як основного, так і допоміжного обладнання. Особливо привабливими в такий час є використання бездротових технологій побудови систем контролю та діагностики. Існує низка сучасних технологічних рішень, які вже стали стандартами бездротового зв'язку і використовуються для обміну даними між об'єктами на певній відстані. Більш широко застосовується серія стандартів IEEE 802.11 (Wi-Fi) [7], стандарт IEEE 802.15.1 (Bluetooth) [8], а також рішення за стандартом 802.15.4 (ZigBee, WirelessHART, MiWi) [9]. Великі перспективи має використання стандарту LPWAN [9], що забезпечує велику дальність зв'язку, але має обмеження в швидкодії.

Метою роботи є аналіз особливостей побудови бездротових елементів експертної системи (ЕС) моніторингу і діагностики електротехнічного обладнання та деяких методів побудови розв'язувальних правил [10]. Основну увагу в роботі приділено питанням побудови інформаційних каналів та розв'язувальних правил з використання моделей лінійних випадкових процесів як математичних моделей інформаційних сигналів електротехнічного обладнання (ЕО).

Особливості побудови безпроводних елементів багаторівневої ЕС вібродіагностики ЕО.

В Інституті електродинаміки НАН України проводяться дослідження з розробки багаторівневих ЕС вібродіагностики електротехнічного обладнання, які включають в себе блоки бездротових систем передачі інформаційних сигналів. Створено лабораторний зразок такого безпроводного блоку передачі та обробки інформаційних сигналів.

© Гижко Ю.І., Зварич В.М., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-5702-4738>; ** <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



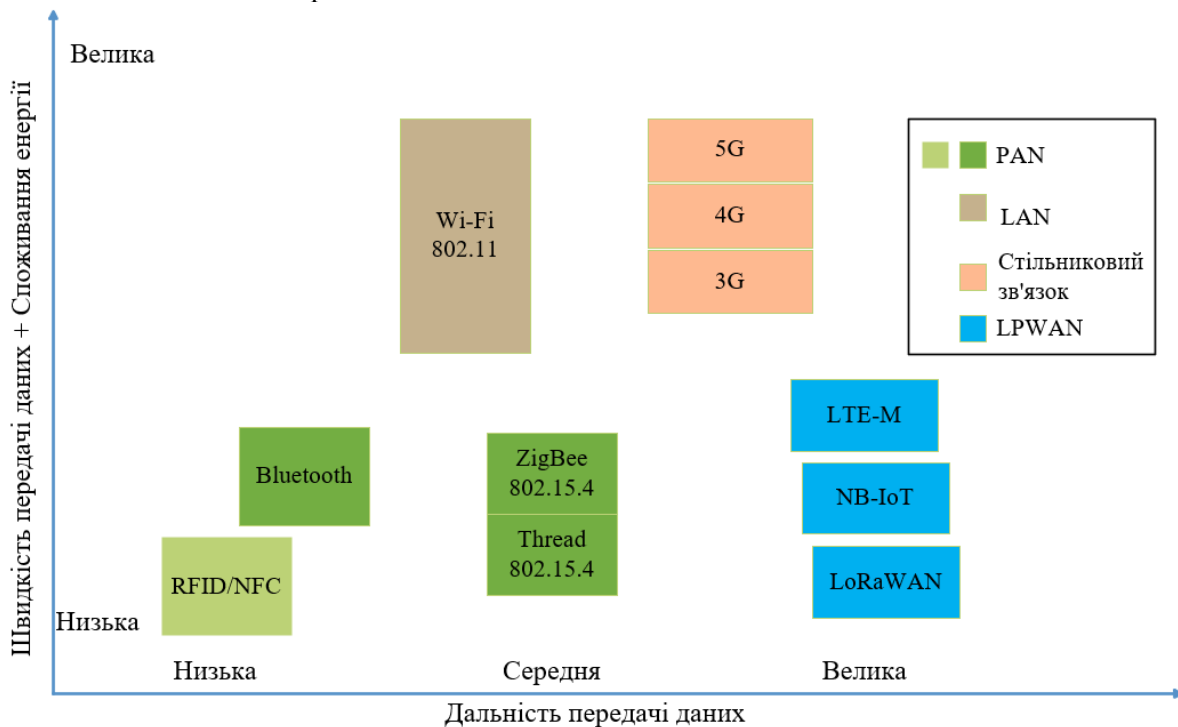
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Бездротова ЕС вібродіагностики має блоки вимірювання, перетворення та передачі інформації (технічні засоби) та блоки, які реалізують програмне управління ЕС, статистичну обробку вимірювальних сигналів, та побудову розв'язуючих правил з визначення технічного стану обладнання, що діагностується (програмні засоби).

Блок сенсорів виконує функцію виміру, обробки та передачі вимірювальних інформаційних сигналів на окремих вузлах електричних машин. У процесі створення лабораторного зразка ЕС вібродіагностування використовувалися принципи модульності задля забезпечення можливості модифікації ЕС з урахуванням конкретних потреб користувача.

На етапі створення елементів ЕС, які враховують особливості функціонування об'єкту діагностування, важливим кроком є визначення типу бездротового протоколу зв'язку та розробка алгоритму функціонування автономного вимірювального перетворювача, що буде враховувати як особливості каналу передачі даних, так і потреби в отриманні та передачі діагностичної інформації.

На рисунку наведено порівняння найпоширеніших протоколів передачі даних з точки зору швидкодії та дальності передачі даних.



Розглянемо варіант побудови блока сенсорів, що базується на використанні сенсора ADXL202 виробництва компанії Analog Devices [12] та протоколу передачі даних Bluetooth [8].

Фізично блок сенсорів, який використано у створеному лабораторному зразку ІВС вібродіагностування, містить наступні основні складові: два акселерометра ADXL202 [12]; мікроконтролер PIC16LF873-041[13] виробництва компанії Microchip Technology; модуль Bluetooth EUMF2CAMM-XX [14] виробництва компанії TAIYO YUDEN.

Вібраційний сигнал, виміряний на електричній машині, що діагностується, на виході сенсора представляється в аналоговому вигляді.

Особливістю даного блока сенсорів є висока швидкість безпроводного каналу, але відносно невисока автономність функціонування блоку сенсорів без використання енергозберігаючих алгоритмів, що враховують характеристики роботи об'єкту діагностування, та без застосування додаткових пристроїв накопичення енергії як складової безпроводного блоку сенсорів.

Запропоновано також використання сенсорів серії 8911 виробництва компанії TE connectivity, які використовують безпроводний канал передачі LoRaWAN [9], що, в залежності від частоти передачі діагностичної інформації, забезпечує можливість автономного функціонування протягом п'яти років та можливість обробки вібраційного сигналу з частотою до 15кГц (резонансна частота 30 кГц). Блок сенсору серії 8911 складається також з мікропроцесора, який згідно з вбудованим

програмним забезпеченням оцінює спектри зареєстрованого сигналу та фіксує їхні пікові значення на визначених частотах. Тобто, після формування навчальних сукупностей для певного вузла діагностування його можливо використати як основний сенсор для автономного діагностування вузлів обладнання на певному ієрархічному рівні Smart Grid з можливістю самостійного визначення критичних значень віброприскорення для передачі інформації на оперативний рівень. Це забезпечує можливість прийняття рішення про наявність дефекту об'єкту діагностування. Особливістю використання даного сенсору є широкий частотний діапазон вимірюваного сигналу, висока автономність функціонування, але низька швидкодія безпроводного каналу передачі даних.

Застосування комплексного підходу для створення ЕС вібродіагностики, яка враховує як можливості блоків сенсорів, особливості функціонування об'єкту діагностування та його окремих вузлів, розробку методик діагностування та алгоритмів керування блоками сенсорів разом з програмним забезпеченням, що відповідає за формування навчальних сукупностей та прийняття діагностичних рішень, дає змогу створювати ЕС з мережею безпроводних сенсорів.

Використання лінійних випадкових процесів з дискретним часом в задачах побудови розв'язувальних правил багаторівневих систем діагностики ЕО.

Лінійні випадкові процеси знаходять все більше застосування під час вирішення завдань виділення (детектування) та класифікації інформаційних сигналів у радіотехніці, геофізиці, вібродіагностиці, біомедичних дослідженнях. Важливим завданням застосування лінійних випадкових процесів у програмах є розробка методів класифікації таких процесів та їх використання в задачах діагностики ЕО.

Розглянемо деякі підходи (методи) для побудови розв'язувальних правил, які можна застосувати у разі використання випадкових процесів як математичної моделі інформаційних сигналів [2, 10, 15–18]. В даній роботі як математичні моделі будемо використовувати лінійні процеси авторегресії [2, 10, 19].

Лінійним процесом авторегресії (AR) [10,20] називається процес який задається наступним різницеvim рівнянням:

$$\xi_t + a_1 \xi_{t-1} + \dots + a_p \xi_{t-p} = \zeta_t, \quad (1)$$

де a_1, \dots, a_p – параметри авторегресії; p – порядок авторегресії; ζ_t – породжуючий процес ξ_t . Для лінійних (AR) процесів, породжуючий процес є процесом з незалежними значеннями, що має безмежно подільний закон розподілу.

Якщо корені характеристичного рівняння

$$\Psi(z) = a_p + a_{p-1}z + \dots + a_1 z^p \quad (2)$$

лежать усередині одиничного кола, рівняння має єдине стаціонарне рішення

$$\xi_t = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau) \zeta_{t-\tau}. \quad (3)$$

Ядро $\{\varphi(\tau), t \in \mathbb{Z}\}$ пов'язане з параметрами авторегресії $\{a_j, j = \overline{1, p}\}$ рекурентними співвідношеннями [10]

$$\varphi^*(k) = \begin{cases} 0 & k < 0 \\ 1 & k = 0 \\ b_k + \sum_{\tau=1}^p a_\tau \varphi^*(k - \tau) & \end{cases}. \quad (4)$$

Передбачається, що $\varphi(0) = 1$; $\sum_{\tau=0}^{\infty} |\varphi(\tau)|^2 < \infty$.

У разі використання параметрів авторегресії як інформативних ознак в задачах діагностики технічного стану технічних об'єктів розв'язувальні правила можна побудувати в багатовимірних просторах. Таку задачу вібродіагностики вузлів енергетичного обладнання та побудову розв'язувальних правил у багатовимірних діагностичних просторах розглянуто у роботах [2, 10].

Задля побудови розв'язувальних правил діагностики вузлів енергетичного обладнання пропонується використовувати ядра лінійних випадкових процесів. Причому така процедура

передбачає можливість побудови розв'язувальних правил у випадку, коли інформаційні сигнали описуються різними типами лінійних випадкових процесів, наприклад AR та ARMA.

Експериментальні результати дослідження вібраційних сигналів.

Оцінено ядра лінійних випадкових процесів, що відповідають вібраціям підшипника 309ЕШ2, відповідних як справним підшипникам, так і підшипникам, що мають перекіс $12' \pm 2,5'$. Експериментально було визначено діапазон значень параметрів $\varphi^2(\tau)$. Об'єм вибірки під час оцінки параметра змінювався в діапазоні 100-1000. Методична помилка, пов'язана з обмеженим обсягом вибірки у такому діапазоні, $\delta \leq 0.01\%$.

Як показано в роботі [21], можна побудувати міру різниці між стаціонарними процесами авторегресії [4], використовуючи ядра таких процесів. Така міра визначається відстанню $d[\xi_1(t), \xi_2(t)]$, яку можна визначити таким чином:

$$d[\xi_1(t), \xi_2(t)] = \sqrt{\sum_{\tau=0}^{\infty} (\varphi_{\xi_1}(\tau) - \varphi_{\xi_2}(\tau))^2}, \quad (5)$$

де $\varphi_{\xi_1}(\tau)$ – ядро лінійного стаціонарного процесу авторегресії $\xi_1(t)$; $\varphi_{\xi_2}(\tau)$ – ядро лінійного стаціонарного процесу авторегресії $\xi_2(t)$. Зазначимо, що таким чином можна побудувати розв'язувальні правила для лінійних процесів авторегресії, що мають різний порядок авторегресії, а також побудувати розв'язувальні правила для процесів авторегресії та процесів ковзного середнього. Відповідно до [21], функція $d[\xi_1(t), \xi_2(t)]$ завжди існує і задовольняє властивостям функції відстаней тобто, вона позитивна, існує нульовий елемент і має місце нерівність трикутника.

Розглянемо наступний приклад. Нехай вібраційний сигнал, що апроксимується процесом авторегресії п'ятого порядку, який відповідає справному підшипнику 309 ЕШ2: $a_1 = -0.9854$; $a_2 = 1.2509$; $a_3 = -0.5536$; $a_4 = 0.4249$; $a_5 = 0.0426$, а процесом авторегресії четвертого порядку апроксимується вібраційний сигнал, який відповідає підшипнику 309 ЕШ2 з перекосом $12' \pm 2,5'$: $a_1 = -1.1281$; $a_2 = 1.4005$; $a_3 = -0.7095$; $a_4 = 0.5145$.

Тоді

$$d[\xi_1(t), \xi_2(t)] = \sqrt{\sum_{\tau=0}^{\infty} (\varphi_{\xi_1}(\tau) - \varphi_{\xi_2}(\tau))^2} = 0.9836.$$

Таким чином, $d[\xi_1(t), \xi_2(t)]$ можна використати як діагностичну ознаку. Вона дає можливість побудувати розв'язувальні правила для випадку апроксимації реалізацій вібраційних сигналів лінійними процесами AR та ARMA різних порядків та з різними значеннями коефіцієнтів.

Висновки.

У відповідності з сформульованою метою отримані наступні основні результати.

1. Показані особливості бездротових елементів багаторівневих ІВС діагностики електротехнічного обладнання та створеного лабораторного зразка елемента таких бездротових елементів.

2. Наведено один з способів побудови розв'язувальних правил з діагностики електротехнічного обладнання у разі використання лінійних AR процесів як математичні моделі вібраційних сигналів, що використовує ядра таких процесів як діагностичні ознаки.

Роботу виконано за державною науково-дослідною роботою «Діагностика-ЕМ-3» державний реєстраційний номер 0120U002002 (КПКВК 6541030) та в рамках проекту 2023.04/0022 «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень системи тепло- та водопостачання з врахуванням їх зношеності та мілітарних впливів», що виконується за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України (НФДУ).

1. Titko O.I. Increased reliability and efficiency of electric machines in dynamic modes of generating power units. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2009. Vol. 23. Pp. 83-90. (Ukr)

2. Zvaritch V.N., Myslovych M.V., Gyzhko Y.I. Application of Linear Random Processes to Construction of Diagnostic System for Power Engineering Equipment. In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*. APMS. IFIP *Advances in Information and Communication Technology*. 2021. Vol. 630. Part 1. Pp. 617-622. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_67.

3. Bently Nevada Machine Condition Monitoring. URL: <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada> (accessed at 15.04.2024).
4. Timken World. URL: <https://www.timken.com/timken-world/products/> (accessed at 15.04.2024).
5. Siemens Product & Services. URL: <https://www.siemens.com/> (accessed at 05.04.2024).
6. ABB Power-Generation. URL: <https://www.new.abb.com/power-generation/> (accessed at 15.03.2024).
7. IEEE 802.11-2016. IEEE Standard. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/> (accessed at 15.04.2024).
8. IEEE 802.15.1-2005 IEEE Standard. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.1/3513/> (accessed at 20.03.2024).
9. IEEE 802.15.4 IEEE Standard. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15.4 (accessed at 15.04.2024).
10. Babak V., Babak S., Myslovych M., Zaporozhets A., Zvaritch V. Methods and Models for Information Data Analysis. *Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 281. Pp. 23-70. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2 (accessed at 15.04.2024).
11. TE 8911 Wireless Accelerometer. URL: <https://www.te.com/en/about-te/news-center/8911-wireless-accelerometer.html> (accessed at 10.04.2024).
12. Analog Devices ADXL202. URL: <https://www.analog.com/en/products/adxl202.html> (accessed at 15.04.2024).
13. Microchip PIC16F873-04. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/pic16f873> (accessed at 11.04.2024).
14. Taiyo Yuden EYMF2Camm-XX Datasheet. URL: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/117754/TAIYO-YUDEN/EYMF2Camm-XX/3679/5/EYMF2Camm-XX.html> (accessed at 15.04.2024).
15. Anderson T.W. The statistical analysis of time series. John Wiley & Sons, Inc, 1971. 558 p.
16. Berger D. Levy driven CARMA generalized process and stochastic partial differential equations. *Stochastic Processes and their Applications*. 2020. Vol. 130(10). Pp. 5865-5887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spa.2020.04.009>.
17. Brockwell P., Lindner A. Prediction of Levy-driven CARMA processes. *Journal of Econometrics*. 2015. Vol. 189(2). Pp. 263-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2015.03.021>.
18. Ge. R., Zhai Q., Wang H., Huang Ya. Wiener Degradation Models With Scale Mixture Normal Distributed Measurement Errors for RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 173. 109029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109029>.
19. Scherbak L., Fryz M., Hotovych V. Electricity consumption simulation using random coefficient periodic autoregressive model. 4th International Conference on *Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters* (ICFS-2023). Kryvyi Rih, Ukraine, 22-26 May 2023. Vol. 1254. 012026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012027>.
20. Zvaritch V. Some Singularities of Linear AR Processes Characterization in Applied Problems of Power Equipment and Power Systems Diagnosis. In: Kyrylenko O., Denysiuk S., Strzelecki R., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (eds). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 512. Pp. 263-278. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_12.
21. Triacca U. Feedback causality and distance between ARMA models. *Mathematical and Computing in Simulation*. 2004. Vol. 64. Pp. 679-685.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF ELEMENTS OF MULTILEVEL EXPERT SYSTEMS FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT UNITS, TAKING INTO ACCOUNT THE USE OF WIRELESS SYSTEM ELEMENTS

Yu.I. Gyzhko, V.M. Zvaritch
Institute of Electrodynamics National Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: zvaritch@gmail.com.

Some peculiarities of construction of elements of wireless communication channels, which are part of multilevel information and measuring systems for diagnosing electrical equipment, are considered. One of the possible options for constructing the primary measurement channel, focused on the use of wireless measurement sensors that are consistent with international standards, is considered. A brief description of possible diagnostic features for determining the technical condition and classification of possible defects in individual components of electrical equipment is given. References 21, figures 1.

Key words: electrical engineering equipment, diagnostics system, linear AR processes.

Надійшла 25.04.2024
Остаточний варіант 03.06.2024