

УДК 681.518.5:621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.150>

ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ МОНІТОРИНГУ І ДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Ю.І. Гижко*, канд. техн. наук, М.С. Гуторова**, канд. техн. наук, В.М. Зварич***, докт. техн. наук, Г.А. Кузік, М.В. Мислович****, докт. техн. наук, Л.Б. Остапчук*****, канд. техн. наук, В.О. Тітко *****, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: gyzhko@ukr.net, ma_gu@ukr.net, zvaritch@gmail.com, vika.ostapchuk2012@gmail.com, titko.ied@gmail.com

Розглянуто особливості побудови і практичного застосування багаторівневих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу і діагностики електротехнічного обладнання. Наведені результати побудови та дослідження математичних моделей деяких діагностичних сигналів (акустична емсія, вібрації), що супроводжують роботу вузлів електротехнічного обладнання (в тому числі і потужних генераторів). Запропоновано удосконалені математичні моделі вібраційних інформаційно-діагностичних сигналів, що враховують як властивості об'єктів діагностування, так і режими, у яких працює таке обладнання. За результатами аналізу математичних моделей розглянутих інформаційних сигналів теоретично обґрунтована низка діагностичних ознак, що дозволяє здійснювати моніторинг і встановлювати технічний стан окремих вузлів генераторів. Розглянуто використання акустоемісійних і вібраційних діагностичних сигналів для формування навчальних сукупностей, що входять до складу багаторівневої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу і діагностики електротехнічного обладнання. Для формування таких навчальних сукупностей була використана інформаційна база, отримана на експериментальних випробувальних стендах ІЕД НАН України. Визначено необхідність врахування впливу температури та вологості на оцінки діагностичних ознак при проведенні моніторингу і діагностики електротехнічного обладнання. Бібл. 26, рис. 8.

Ключові слова: вібраційний та акустоемісійний діагностичні сигнали, електротехнічне обладнання, система моніторингу і діагностики.

Вступ. При розв'язку задачі моніторингу та діагностування електротехнічного обладнання (ЕО) енергопідприємств виникає проблема вимірювання та обробки великої кількості інформаційних сигналів, що потребує використання значних за об'ємами вимірювальних та обчислювальних ресурсів. Такий підхід ускладнює структуру інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), що використовується і, як наслідок, призводить до зниження її надійності та підвищення вартості. Певною мірою вирішити цю задачу вдається шляхом розробки і практичного застосування розподіленої багаторівневої ІВС моніторингу і діагностики ЕО. Згідно з [1–4], у розподілених багаторівневих системах вимірювальна інформація піддається попередньому аналізу безпосередньо у місці її отримання для того, щоб відокремити тільки ту її частину, яка важлива для визначення стану всього технічного об'єкта. Водночас передача інформації в центральний модуль діагностичної системи для її подальшого глибокого аналізу здійснюється лише за наявності обґрунтованої причини вважати, що у контрольованому вузлу є критичний дефект. Завдяки цьому суттєво зменшуються обсяги даних, що передаються між модулями системи моніторингу та діагностування, знижується навантаження на її елементи.

На сьогодні у багатьох розвинених країнах світу при побудові систем моніторингу і діагностування електроенергетичних об'єктів все частіше використовується концепція Smart Grid [1, 5–10]. Розроблення і подальше впровадження на енергопідприємствах України таких систем передбачає як створення відповідного програмного забезпечення, так і оснащення певних енергооб'єктів необхідними технічними засобами.

Експериментальні результати [11] (на двох прикладах – редуктора вітряної турбіни та промислового портового крана) показують, що запропонований підхід ансамблевого навчання перевершує інші традиційні підходи глибокого навчання щодо точності прогнозування та



стабільності прогнозу під час роботи з поєднанням мультисенсорних ознак та точної ідентифікації несправностей важких промислових машин. Однак значне збільшення кількості первинних сенсорів для вимірювання діагностичної інформації призводить до суттєвого зростання обчислювальних операцій з обробки експериментальних даних. І саме для подібних випадків, можна скористатись для обробки діагностичної інформації багаторівневими ІВС діагностики, що працюють за Smart Grid технологіями.

Базуючись на роботах [1, 3, 12], було розроблено узагальнену структуру багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування ЕО [13], яка працює з урахуванням концепції Smart Grid. У свою чергу використання розподілених обчислювальних ресурсів та врахування ступеня критичності дефектів різних вузлів електротехнічного обладнання у ІВС, що запропонована в [2, 12] забезпечує зниження вартості самої ІВС при одночасному збереженні високих показників точності та вірогідності виявлення дефектів за її допомогою.

Для успішної реалізації багаторівневої системи передбачено створити модулі та відповідні блоки, що надають можливість виконувати необхідні вимірювання та обчислення, а також мають невисоку вартість. Одним із основних блоків, що має входити до структури ІВС моніторингу і діагностування вузлів ЕО, є блок, який вміщує у собі результати навчання такої системи [13]. Слід також зазначити, що для розв'язання вказаних задач у цьому блоку мають бути розміщені навчаючі сукупності (НС), які б враховували можливі види дефектів, що найбільш типові для цього вузлу та мали б відповідну інформацію про режими (електричні, швидкісні, температурні та ін.) роботи цього вузлу [13].

Відомо [1, 2, 4, 7–9, 12], що системи побудовані за технологією Smart Grid мають працювати у режимі реального часу, тобто така система повинна оперативно знаходити у блоку НС відповідну сукупність, яка містить інформацію як про вид можливого дефекту цього об'єкту, так і про режим його роботи. Вибір необхідної НС безпосередньо пов'язаний з подальшим розв'язанням задачі визначення технічного стану і класифікації можливих дефектів у вузлі ЕО, що діагностується. Саме від форми представлення і систематизації НС залежить можливість функціонування системи моніторингу і діагностування ЕО за технологією Smart Grid. Розгляду цих питань було присвячено роботу [3].

Особливо нагально проблема розробки і практичного застосування подібних систем виникає у зв'язку із перспективою створення в Україні і подальшого введення в експлуатацію турбогенератора потужністю 1000 МВт, призначеного для роботи в умовах АЕС. Як відомо [14], на існуючих вітчизняних атомних енергоблоках експлуатуються виключно двополюсні генератори виробництва заводу «Електросила» (нині входить до російського АТ «Силові машини»). Довготривалий досвід експлуатації і аналіз дефектів, що виникали у цих генераторах, дає змогу зробити висновок, що проблеми із двополюсними генераторами мають системний характер. Навіть, виходячи із статистики експлуатації нових генераторів потужністю 1000 МВт енергоблоків № 3 і № 4 Калінінської АЕС (запущені у 2004 і 2012 роках відповідно), можна прийти до висновку, що проблеми із цими машинами спеціалістами ВАТ «Силові машини» так і не були вирішені. Однією із таких проблем була спроба виробників переходу від водневого охолодження генератора до повного водяного, що призвело до появи великої кількості з'єднань між металевими і фторопластовими трубками і, як наслідок, сприяло зниженню показників надійності генератора в цілому. Слід також зазначити, що переважна більшість генераторів у світі, що експлуатуються на енергоблоках АЕС, мають чотириполюсне виконання та одиночну потужність до 1500–1700 МВА.

За даними *CIGRE* основними виробниками таких генераторів на сьогодні є фірми *Alstom* (Франція), *Siemens* (Німеччина) *Asea Brown Boveri* (Швейцарія), *General Electric* (США). Це насамперед зумовлено тим, що чотириполюсні генератори у порівнянні з двополюсними мають низку переваг. Внаслідок більших геометричних розмірів активної зони для таких генераторів характерні менші електромагнітні і теплові навантаження на активні елементи і вузли конструкції. Це перш за все стосується лінійного навантаження статора, індукції в повітряному проміжку та густини струму в обмотках статора і ротора. Проте чотириполюсні генератори у порівнянні з двополюсними однієї потужності мають приблиз-

но в два рази більшу масу ротора, що ускладнює його виготовлення. На сьогодні гранична потужність чотириполюсних генераторів оцінюється у 2000–2500 МВА.

Найбільша кількість поломок і аварійних ситуацій припадає на турбогенератор – до 70–89 % [14], на пристрої релейного захисту і автоматики – до 15 %, на вимірювальні трансформатори, електропривод та силові трансформатори – у сукупності складають близько 16 %. Таким чином, при створенні багаторівневої ІВС моніторингу і діагностики основну увагу слід приділяти моніторингу параметрів інформаційних сигналів, що визначають технічний стан саме окремих вузлів генератора. У генераторах основні дефекти припадають на стрижні в зоні лобових частин і з'єднувальних шин обмотки статора з боку збудника. Основною причиною цих дефектів виявився неприпустимий рівень вібрацій. Тобто у створюваній ІВС моніторингу має бути передбачена можливість проведення вимірювання і аналізу вібраційних діагностичних сигналів.

Робота потужних генераторів супроводжується утворенням і розповсюдженням в їхніх конструкціях і вузлах значних електромеханічних навантажень. Для оцінки впливу цих навантажень на матеріал конструкцій і вузлів генератора можуть бути використані сигнали акустичної емісії (АЕ). Отримання достовірної інформації про електромеханічне навантаження потужних генераторів забезпечується при розміщенні сенсорів акустичної емісії у місцях найбільшої концентрації таких навантажень [15, 16] (зони лобових частин статора і з'єднувальної шини обмотки статора генератора, місця кріплення корпусу генератора до фундаменту).

У процесі експлуатації генераторів виникають також декілька інших типових ушкоджень [14], таких як розгерметизація стрижнів обмотки статора, поява тріщин у міжкотушкових перемичках обмотки ротора та витік водню в газоохолоджувачах. Таким чином, при створенні багаторівневої ІВС моніторингу і діагностики генератора має бути передбачена можливість моніторингу стану вологості водню в корпусі турбогенератора.

Враховуючи викладене, а також наявність в Україні наукової, конструкторської і виробничої потужності Акціонерного товариства «Українські енергетичні машини» слід вважати, що саме розробка, виготовлення та впровадження турбоагрегатів, орієнтованих на використання чотириполюсних генераторів потужністю 1000 МВт і більше для АЕС здатне забезпечити сталий розвиток електроенергетики України у післявоєнний час.

Потужний електричний генератор являє собою достатньо складний електромеханічний об'єкт. З урахуванням складності, а інколи, і унікальності виконання такого об'єкту, саме використання багаторівневих ІВС моніторингу і діагностики, що працюють у відповідності із концепцією Smart Grid, забезпечують можливість отримання діагностичної інформації в реальному часі, яка надходить від різних його вузлів. Крім того, для підвищення достовірності його діагностування може бути використана мультисенсорна система сенсорів [11].

Безперечно, що водночас зі створенням зазначеного електроенергетичного обладнання має бути розроблено, виготовлено і введено в експлуатацію багаторівневі ІВС, які здатні забезпечити його моніторинг і діагностування технічного стану

Результати проведеного розгляду вищевказаних робіт зумовили тему цієї статті.

Основною метою роботи є створення теоретичної бази, методів та інформаційного забезпечення для розробки і побудови дослідного зразка багаторівневої ІВС моніторингу та діагностики електроенергетичного обладнання (ЕЕО), який призначений для забезпечення надійного функціонування такого обладнання (в тому числі і потужного генератора) у складі АЕС.

Розглянуто деякі моменти, пов'язані із результатами розробки **математичних моделей** діагностичних інформаційних сигналів, які надали можливість обґрунтувати діагностичні ознаки, за кількісними оцінками яких, у свою чергу, було сформовано навчаючі сукупності (НС), що відповідають як певним технічним станам вузлів ЕО, так і режимам їхньої роботи. Застосування елементів теорії лінійних випадкових процесів (ЛВП) [13, 16] при побудові моделей цих сигналів надало можливість отримати статистичні оцінки діагностичних ознак досліджуваних вібраційних сигналів, як для гауссового, так і для інших видів розподілів ймовірностей, що відносяться до класу безмежно подільних законів [17, 18].

Відомо, що процеси АЕ виявляють себе як у неперервній, так і у дискретній формі [16, 19, 20]. Неперервність процесу АЕ можна уявити як результат додавання великої кількості елементарних імпульсів з дуже малою енергією, які призводять до виникнення пружних хвиль у тілі досліджуваного об'єкта. Як математична модель неперервної АЕ використовується модель гауссовського випадкового процесу. Імпульсна модель сигналу АЕ являє собою суперпозицію великої кількості імпульсів, що генеруються випадковим чином за часом елементарними випромінювачами, які розташовано у середині досліджуваного об'єкта. Для опису такої моделі найчастіше використовується випадкова функція виду

$$\xi(t) = \sum_i \eta_i \varphi(t - t_i), \quad (1)$$

де η_i – амплітуда імпульсу АЕ; $\varphi(t - t_i)$ – функція, що характеризує форму імпульсу АЕ; t_i – моменти часу випромінювання i -го імпульсу АЕ, які є пуассонівським потоком подій. Припускається, що η_i і t_i є незалежними випадковими величинами. Для аналізу процесу (1) використовують математичний апарат теорії пуассонівських імпульсних процесів [16].

За результатами проведеного дослідження існуючих моделей як модель сигналу АЕ було обрано модель ЛВП, що визначається наступним чином:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (2)$$

де $\{\eta(\tau), \eta(0) = 0, \tau \in (-\infty, \infty)\}$ – стохастично неперервний процес з незалежними приростами, який називають породним; $\varphi(\tau, t)$ – не випадкова функція, для якої виконується

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^p(\tau, t) d\kappa_p(\tau) \right| < \infty, \quad p = 1, 2, \quad \text{де } \kappa_p(\tau) \text{ – семиінваріант } p\text{-го порядку процесу } \eta(\tau).$$

При побудові математичної моделі сигналу АЕ [16, 21] з використанням ЛВП (2) припускалося, що під неперервною емісією розуміється неперервна у часі генерація деяким джерелом флукуаційного сигналу АЕ, а під імпульсною (дискретною) – спрацювання цього джерела у певні моменти часу, в результаті чого випромінюється імпульс. На основі зроблених фізичних припущень загальну модель сигналу АЕ можна представити у вигляді суми незалежних неперервної та імпульсної складових досліджуваного сигналу

$$\xi(t) = \nu_1 \xi_c(t) + \nu_2 \xi_H(t), \quad (3)$$

де ν_1 і ν_2 – вагові коефіцієнти, що характеризують величину внеску неперервної $\xi_c(t)$ та імпульсної $\xi_H(t)$ компоненти в сигнал АЕ загального виду (3). Припускається, що величина коефіцієнтів ν_1 і ν_2 залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу об'єкта, що діагностується і в якому виникає АЕ сигнал. Неперервна компонента $\xi_c(t)$ цього сигналу має вигляд

$$\xi_c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_c(\tau, t) dw(\tau), \quad (4)$$

де $\varphi_c(\tau, t)$ – функція, що має властивості ядра представлення (2); $\{w(\tau), w(0) = 0, \tau \in (-\infty, \infty)\}$ – гільбертів, у загальному випадку неоднорідний гауссовський процес з незалежними приростами. Таким чином, процес $\xi_c(t)$ також є ЛВП.

Імпульсну компоненту сигналу АЕ можна представити у вигляді

$$\xi_H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_H(\tau, t) d\pi_H(\tau), \quad (5)$$

де $\{\pi_H(\tau)\}$ – узагальнений процес Пуассона [17].

Для процесу (2) характеристична функція (ХФ) у формі Колмогорова запишеться як

$$f(u; \tau) = \exp \left\{ ium(\tau) + \int_{-\infty}^{\infty} (e^{iux} - 1 - iux) \frac{dK(x, \tau)}{x^2} \right\}, \quad \tau \in -\infty, \infty, \quad (6)$$

де $m(\tau) = \mathbf{M}\xi(\tau)$; $K(x, \tau)$, $x \in (-\infty, \infty)$, $K(-\infty, \tau) = 0$, $K(\infty, \tau) = \mathbf{D}\xi(\tau)$ – неспадна по x і неперервна зліва обмежена функція. Функція $K(x, \tau)$ є спектральною функцією або пуассонівським спектром стрибків форми Колмогорова, яка містить інформацію про характеристики як неперервної, так і пуассонівської (імпульсної) складових процесу (2).

Використання моделі дає змогу знайти повні імовірнісні характеристики процесу АЕ, оскільки для ЛВП відомий загальний вид ХФ. Закон розподілу досліджуваного процесу за відомої ХФ може бути знайдено двома способами:

- перший з них полягає у визначенні та дослідженні модуля $R_{\xi}(u)$ і аргументу $A_{\xi}(u)$ ХФ досліджуваного ЛВП $\xi(t)$;
- другий передбачає знаходження та аналіз пуассонівських спектрів стрибків.

Враховуючи результати теоретичних і експериментальних досліджень, можна зазначити, що форма елементарних імпульсів сигналу АЕ може характеризуватись імпульсами релаксаційного типу, які у точці розташування п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) на поверхні об'єкта, що діагностується, і описується функцією

$$\varphi_b(s) = \alpha \cdot e^{-\alpha s} \cdot U(s), \quad s \in (-\infty, \infty), \quad s = t - \tau, \quad (7)$$

де $\alpha > 0$ – коефіцієнт згасання, $U(s)$, $s \in (-\infty, \infty)$ – функція Хевісайда. Ця ж функція може бути використана для опису форми імпульсів АЕ на виході амплітудного детектора. У відповідності з (3) припускаємо, що неперервна складова призведена стаціонарним гауссовським білим шумом з нульовим середнім і дисперсією σ^2 . Що стосується імпульсної складової, то з проаналізованих робіт випливає, що розподіл амплітуд імпульсів цієї складової змінюється залежно від стану навантаження або деформації матеріалу. У загальному випадку розподіл амплітуд цих імпульсів для складової $\{\pi_u(\tau), -\infty < \tau < \infty\}$, $\pi_u(0) = 0$, що входить до складу (5), має вигляд:

$$P_k(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^k}{k!} e^{-\lambda\tau}, \quad \tau > 0, \quad (8)$$

де λ – інтенсивність імпульсної складової у процесі АЕ. У відповідності з [16], випадкова величина $\pi_u(\tau)$ при $\tau > 0$ визначається як сума N незалежних випадкових величин, кожна з яких має свою функцію розподілу. У свою чергу N являє собою число подій, яке відбувається між 0 і τ включно, тобто в момент здійснення кожного з випробувань і відбувається незалежно від випробування, результати яких мають свою певну функцію випробувань, а $\pi_u(\tau)$ – загальна сума результатів цих випробувань за час τ .

При визначенні ймовірнісних характеристик сигналу на виході ПЕП виходили з того, що форма елементарного імпульсу на ньому може бути описана функцією

$$\varphi_b(\tau, t) \equiv \varphi_b(s) = \alpha \cdot e^{-\alpha s} \sin \theta s \cdot U(s), \quad s = t - \tau, \quad s \in (-\infty, \infty), \quad (9)$$

де $\theta > 0, 0 < \alpha < \theta$ – дійсні константи, що мають конкретний фізичний сенс, а саме частоти осциляцій і коефіцієнт згасання відповідно.

У відповідності із [16, 21], з урахуванням математичного моделювання імпульсів АЕ і за результатами експериментів, які проводились на спеціальному обладнанні (розривна машина Р20 та акустоємісійна ІВС діагностики ЕО), було обґрунтовано діагностичні ознаки, які дозволяють встановлювати технічний стан ЕО (по електромеханічному навантаженню), а саме:

- інтенсивність λ процесу АЕ при зміні електромеханічного навантаження на об'єкт діагностування;

- коефіцієнти асиметрії k і ексцесу γ , що характеризують розподіл сигналів АЕ, а також параметри $\beta_1 = k^2$ та $\beta_2 = \gamma + 3$, які є координатами відомої в статистиці діаграми Пірсона [22].

Дуже важливу інформацію про технічний стан потужних генераторів АЕС забезпечує використання вібраційних інформаційних сигналів. Слід також зазначити, що суттєвий вплив на результати вібродіагностики мають режими роботи досліджуваних генераторів.

Застосування елементів теорії лінійних випадкових процесів (ЛВП) при побудові моделей цих сигналів надало можливість отримати статистичні оцінки діагностичних ознак досліджуваних вібраційних сигналів як для гауссового, так і для інших видів розподілів, що відносяться до класу безмежно подільних законів [17, 18].

Запропонована узагальнена математична модель сигналу об'єкта діагностування ЕО, що працює у різних режимах, має вигляд:

$$\Xi_n(t) = (\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)), \quad t \in T, \quad (10)$$

де послідовність компонент $\{\xi_j(t), j = \overline{1, n}\}$ моделі (10) описує послідовність діагностичних вібраційних сигналів ЕО у n режимах його функціонування.

Модель (10) є векторним ЛВП, яка дає можливість врахувати специфіку і характерні можливості різних режимів роботи досліджуваного ЕО.

Таким чином, компонента $\xi_j(t)$ моделі (10) має інтегральне представлення [17] у виді:

$$\xi_j(t) = \int_0^\infty \varphi_j(t - \tau) d\eta(\tau) = \int_0^\infty \varphi_j(t - \tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in T, \quad (11)$$

де детермінована функція $\varphi_j(t)$ характеризує імпульсну перехідну функцію об'єкта дослідження як лінійної системи у j -му режимі функціонування, а породний процес $\eta(t)$ – випадковий процес з незалежними приростами і безмежно-подільними законами розподілу, який враховує дію значної кількості стохастичних факторів, виникаючих при формуванні діагностичного сигналу. Похідна процесу $\eta'(\tau)$ є процесом білого шуму що дає можливість використати поєднання теоретичних і експериментальних результатів досліджень у галузі вібродіагностики.

При дослідженнях багаторезонансного діагностичного вібраційного сигналу (ЛВП) його конструктивна модель описується співвідношенням [22, 23]:

$$\xi_j(t) = \sum_{i=1}^m a_{ji} \xi_{ji}(t), \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in T. \quad (12)$$

У моделі (12) для компоненти $\xi_j(t)$ використані наступні позначення: $m \in N$ – ціле число, яке характеризує кількість резонансних частот; a_{ji} – вагові коефіцієнти, що відображають співвідношення енергій між відповідними резонансними частотами; $\xi_{ji}(t)$ – складова, яка враховує характеристики сигналу на частотах, близьких до i -го резонансу.

Остання складова $\xi_{ji}(t)$ описується наступним співвідношенням:

$$\xi_{ji}(t) = \int_0^\infty \varphi_{ji}(t - \tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad (13)$$

де $\varphi_{ji}(\tau)$ – імпульсна перехідна функція формуючого резонансного i -го фільтру, яка у відповідності з методом електромеханічних аналогій [22] описується наступним чином:

$$\varphi_{ji}(t) = \frac{(2\pi f_{ji})^2}{\psi_{ji}} e^{-\beta_{ji} t} \sin(\psi_{ji} t) U(t), \quad (14)$$

де f_{ji} – резонансна частота; β_{ji} – коефіцієнт, що характеризує ступінь згасання коливань i -ї складової; $\psi_{ji} = \sqrt{(2\pi f_{ji})^2 - \beta_{ji}^2}$ – коефіцієнт, який характеризує ступінь взаємозв'язку

між f_{ji} та β_{ji} ; $U(t)$ – нормалізована функція Хевісайда (одиничний стрибок).

З урахуванням (13) та (14) зміна технічного стану об'єкту діагностування або режиму його функціонування обумовлена змінами параметрів імпульсної функції $\varphi_{ji}(\tau)$ чи породного процесу $\eta'(\tau)$. Як діагностичні ознаки математичних моделей вібродіагностичних сигналів можуть бути обрані наступні параметри і характеристики [22], що враховують як різні режими, так і можливий технічний стан об'єктів діагностування ЕО:

– при спектрально-кореляційному аналізі: коефіцієнти затухання β_{ji} ; частотні параметри ψ_{ji} , $j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$;

– при аналізі ймовірнісного розподілу: характер функції щільності розподілу ймовірностей; величини початкових і центральних моментів, серед яких найбільш інформативними є коефіцієнти асиметрії k та ексцесу γ .

При створенні систем моніторингу і діагностування енергетичного обладнання достатньо широкого застосування знайшли процеси авторегресії та авторегресії-ковзного середнього. Математичні моделі інформаційних сигналів, побудованих на базі цих процесів, докладно описані в роботах [23, 24].

З урахуванням [3, 13] сформовану множину діагностичних просторів Ω можна представити у наступній матричній формі

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_{00} & \omega_{01} & \dots & \omega_{0n} \\ \omega_{10} & \omega_{11} & \dots & \omega_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{k0} & \omega_{k1} & \dots & \omega_{kn} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

У наведеній формі підпростори, що розташовані по рядках, відповідають однаковим технічним станам цього вузлу, але працюючим у різних режимах, при яких експлуатується досліджуване ЕО, а кожний стовпчик відповідає певному (незмінному) режиму роботи вузла, але маючим різні технічні стани. Тобто певному технічному стану досліджуваного об'єкту по стовпчиках при ω відповідають індекси, які залежно від справного стану або певного дефекту в об'єкті змінюються в межах від 0 до k . У свою чергу зміні режиму роботи ЕО по рядках відповідають індекси при ω , які змінюються від 0 до n .

Ієрархія при побудові багаторівневої ІВС моніторингу і діагностики ЕО реалізується шляхом умовного розбиття всього ЕО електростанції на певні ієрархічні рівні. Розроблено узагальнену структуру багаторівневої системи моніторингу стану та діагностики електроенергетичного обладнання, яка складається з ряду модулів, кожен з яких призначений для відбору та попередньої обробки вимірювальної інформації про технічний стан певного вузла (генератор, циркуляційний насос, трансформатор тощо), та одного центрального модуля, який збирає і узагальнює інформацію від всіх місцевих модулів, а також може за необхідності узагальнювати дані і передавати їх на більш високий рівень ієрархії (рис. 1).

Рівень I – первинний відбір та підготовка діагностичних сигналів (вимірювання діагностичних сигналів, підсилення, аналогова фільтрація, перетворення в цифрову форму).

Рівень II – попередня математична обробка і прийняття проміжних діагностичних рішень (прості алгоритми, реалізація яких не вимагає значних обчислювальних ресурсів, розділення інформації по ступеню критичності дефектів); сигналізація на вищий рівень при наявності дефектів; накопичення незначних обсягів вимірювальної інформації та передача її на вищий рівень.

Рівень III – накопичення, повноцінна обробка і глибокий аналіз даних, швидке реагування на аварійні сигнали з нижчого рівня, прийняття діагностичних рішень по об'єкту діагностики в цілому, архівація статистичних даних, прогнозування надійності та оцінка залишкового ресурсу обладнання, планування ремонтних робіт.

Рівень IV – представлення даних різним користувачам (у тому числі територіально віддаленим, наприклад через Web технології) з розмежуванням прав доступу.

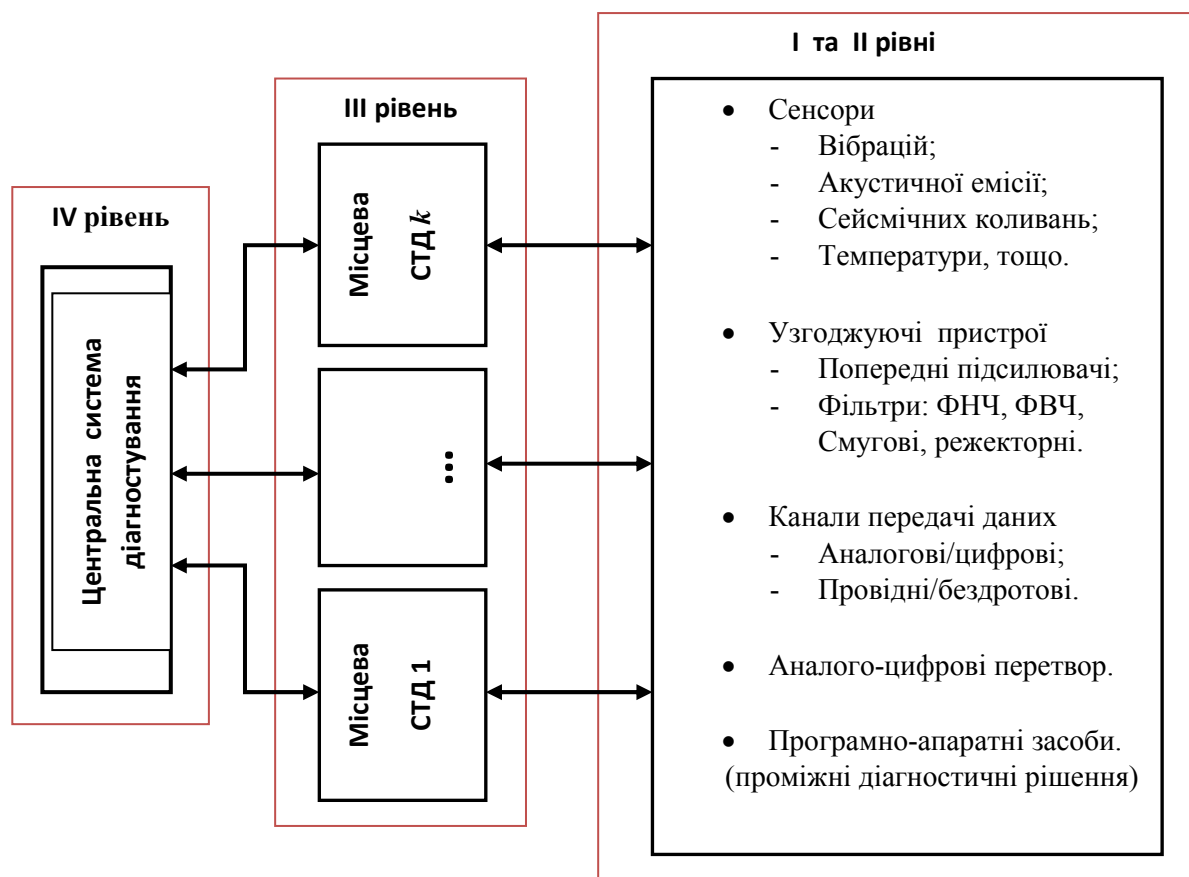


Рис. 1

Розподіл функцій між цими ієрархічними рівнями може бути організований так, що функції рівнів з I по III об'єднується в окрему підсистему для кожного великого об'єкта, що входить до складу електростанції і достатньо компактно розташовані в просторі - Місцевою системою технічного діагностування (СТД). Рівень IV об'єднує інформаційні потоки, що надходять з різних систем рівня III - Центральну систему.

Структура місцевої та центральної систем діагностування ЕЕО електростанції деталізується на рис. 2 і 3 відповідно. Виходячи із наведених рівнів, враховуючи [3], були запропоновані моделі формування і зберігання НС для банку даних ІВС діагностування ЕО, які схематично зображено на рис. 4, 5. У відповідності із цими моделями НС, що відповідають як певному технічному стану ЕО та і режиму його роботи, можуть бути реалізовані у плоскій та об'ємній матричних формах, у 2D – форматі (рис. 4) і 3D – форматі (рис. 5).

На рисунках позначено: ОД – об'єкт діагностики; ВП – вимірювальний перетворювач (сенсор); БУ – блок узгодження; К – комутатор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; БП – блок перетворення; МК – мікроконтролер; ЗБЗ – засоби бездротового цифрового зв'язку; ЕОМ – електронна обчислювальна машина; ППП – пакет прикладних програм для аналізу даних, прийняття діагностичних рішень, оцінки залишкового ресурсу тощо; ЦСД – центральна система діагностування; МСДп – місцеві системи діагностування; LAN – локальна мережа (Intranet); WAN – глобальна мережа (Internet); R, FW – засоби захисту інформації (Router, Firewall).

Таке представлення НС дозволяє їх систематизувати по окремим вузлам і агрегатам усього ЕО, що представлено на електростанції і може бути охоплено системою діагностування. Так, у форматі 2D (рис. 4) представляються НС, що охоплюють дані по одному з вузлів (це відповідає 2-му рівню у запропонованій ієрархії). По стовпчиках запропонованої матриці розташовані елементи, що відповідають певним видам дефектів, які можуть виникати при експлуатації досліджуваного вузла при конкретному фіксованому режимі його роботи, і

які відповідають однаковим технічним станам (справним, або маючим конкретні види дефектів), але працюючим у різних режимах.

На рис. 5 наведена об’ємна 3D матриця, яка поєднує декілька вузлів, що складають певний агрегат (наприклад, електродвигун власних потреб), який входить до складу ЕО електростанції. Кожний перетин цієї 3D матриці являє собою плоску 2D матрицю, відповідає певному вузлу (наприклад, підшипник кочення), що входить до складу досліджуваного агрегату. Система позначень елементів у наведеній матриці залишається такою ж, як і у попередньому випадку для 2D матриці (рис. 4). Третій індекс відповідає номеру вузла, що входить у досліджуваний агрегат. Цей індекс змінюється і відповідає загальній кількості вузлів в агрегаті. З урахуванням запропонованої чотирирівневої ієрархічної системи [1, 2], досліджуваний агрегат належить до третього ієрархічного рівня.

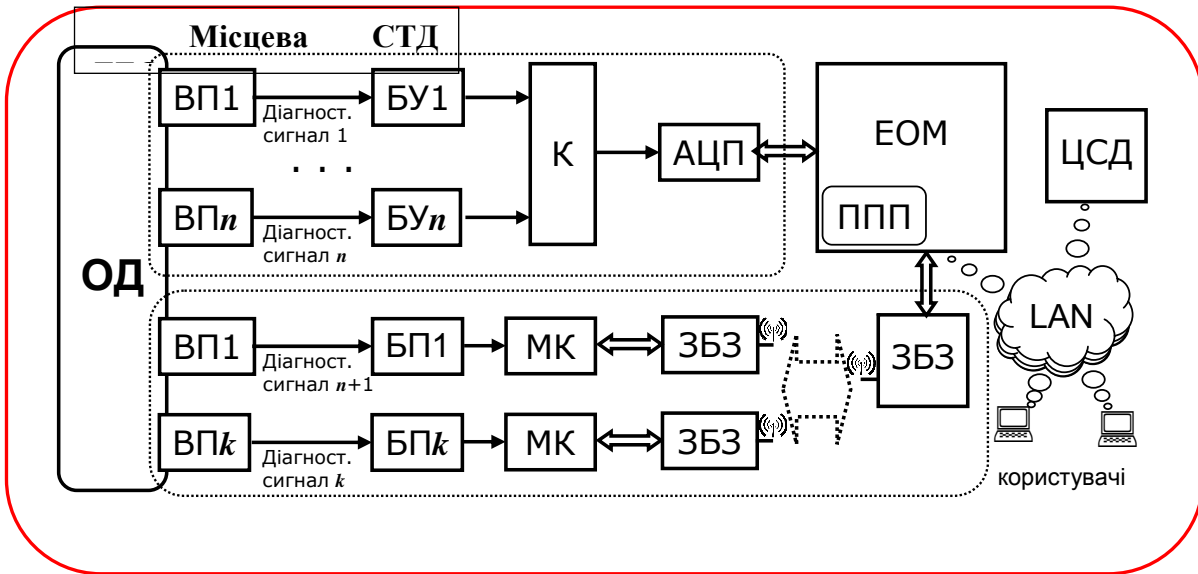


Рис. 2

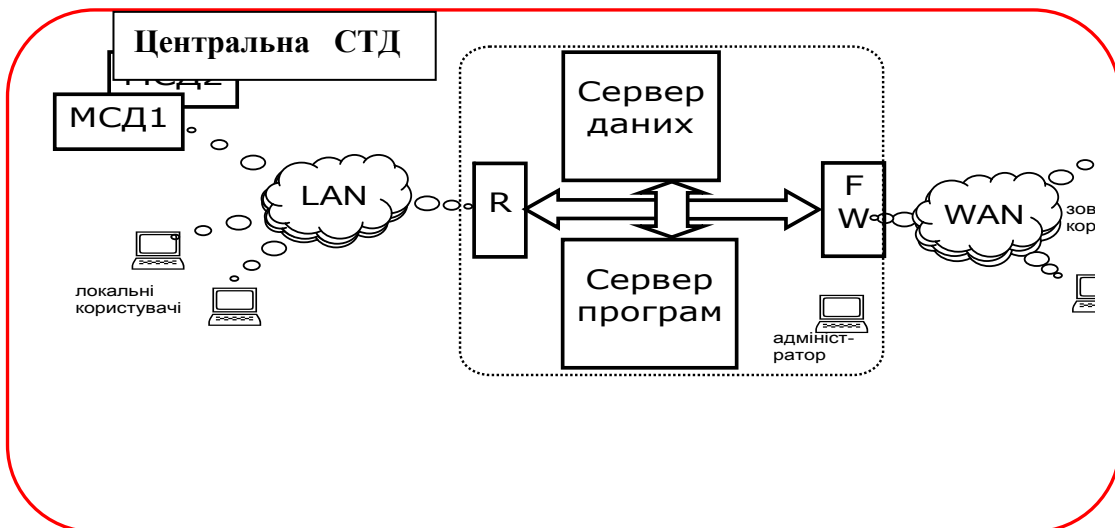


Рис. 3

Окрім виду дефектів, які враховуються при формуванні НС з використанням 2D та 3D матриць, в багаторівневих ІВС моніторингу і діагностики може бути врахована і ступінь катастрофічності дефектів. З точки зору оптимізації складності системи діагностування доцільним є розподіл усіх у даному об’єкті діагностування дефектів [1, 3] на три класи: катастрофічні, некатастрофічні, часткові.

Очевидно, що будь-яка система діагностування повинна обов’язково виявляти катастрофічні дефекти. Разом з тим, деякі некатастрофічні чи часткові дефекти можна залишити поза увагою системи. Такий підхід до розробки системи дає можливість спростити її струк-

туру, зменшити обсяги інформації, що обробляються в системі та передаються між її ієрархічними рівнями, і здешевити її.

ω_{00}	ω_{01}	ω_{02}	...	ω_{0n}
ω_{10}	ω_{11}	ω_{12}	...	ω_{1n}
ω_{20}	ω_{21}	ω_{22}	...	ω_{2n}
...
ω_{k0}	ω_{k1}	ω_{k2}	...	ω_{kn}

Рис. 4

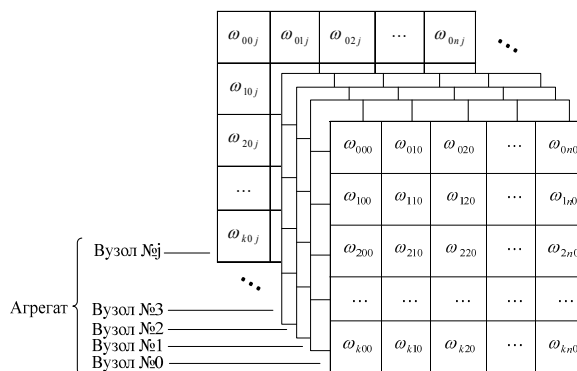


Рис. 5

Практично всі сучасні системи діагностування (особливо на принципах концепції Smart Grid) побудовані на основі цифрових обчислювальних засобів (мікроконтролерів, персональних комп'ютерів, промислових робочих станцій). Таким чином, виміряні сигнали повинні перетворюватися в цифрову форму і приводитися до деякого уніфікованого рівня по напрузі, а також до вибраної смуги частот.

Для подальшого аналізу інформації та прийняття діагностичних рішень передаються в обчислювальне ядро системи, яке, в залежності від конкретної потреби, може являти собою як малопотужний мікроконтролер, так і сучасний надпотужний комп'ютер чи кластерну серверну систему.

Кінцевий етап обробки інформації в рамках системи діагностування обладнання електростанції – це відображення результатів користувачам, з засобами, які, зокрема, повинні забезпечувати авторизацію користувачів системи, розділення прав доступу, захист інформації.

Врахування ступеня критичності дефектів на етапі розробки системи дає можливість спростити її структуру, зменшити обсяги інформації, що обробляються в системі та передаються між її ієрархічними рівнями, і в кінцевому результаті знизити вартість системи при збереженні її функцій на достатньому рівні.

Результати декількох експериментів[16, 21], ілюструють застосування інформаційних діагностичних сигналів, а саме процесів акустичної емісії та вібрації, і можуть бути використані при побудові систем моніторингу і діагностики ЕО, які працюють у відповідності з концепцією Smart Grid.

Для дослідження процесів АЕ використовувались зразки електротехнічної сталі Е330 спеціальної геометричної форми, що встановлювались у випробувальній розривній установці Р-20 для забезпечення розтяжного зусилля, якому можна поставити у відповідність певну кількісну оцінку інтенсивності виникнення імпульсів АЕ. На рис. 6 представлено графік навантаження випробувальних зразків зі сталі Е330, які випробувались на розривній установці Р-20. По осі абсцис на цьому рисунку відкладається часовий інтервал, протягом якого проводиться навантаження, а по осі ординат – відношення випробовуваного тиску до робочого Р/Рраб. Вимірювання параметрів АЕ проводилися при витримці тиску на кожному етапі протягом п'яти хвилин. Проведення випробувань було короткочасним. На кожному етапі навантаження ІВС АЕ діагностики включалася дискретно на 1 с протягом 5 хв декілька десятків разів.

На базі отриманих оцінок діагностичних ознак, а саме оцінок коефіцієнтів асиметрії k і ексцесу γ , які характеризують розподіл АЕ сигналів в просторі відомої в статистиці діаграми Пірсона з координатами (β_1, β_2) , було сформовано навчаючі сукупності у вигляді еліпсів розсіяння, що відповідали певному ступеню навантаження на випробувальний зразок.

На основі отриманих експериментальних даних були сформовані навчаючі сукупності, які увійшли до складу блоку НС створеної ІВС АЕ діагностики. У відповідності із обґрунтованими діагностичними ознаками (коефіцієнти асиметрії k і ексцесу γ , які характеризують розподіл АЕ сигналів), а також на основі використання параметрів $\beta_1 = k^2$, $\beta_2 = \gamma + 3$, які є координатами (β_1, β_2) відомої в статистиці діаграми Пірсона [21, 22], у діагностичному просторі з цими координатами було сформовано НС, що відповідають певному ступеню навантаження на сталений зразок, що досліджувався на машині Р-20. На рис. 7 представлені НС в діагностичному просторі (β_1, β_2) , сформовані за результатами обробки з використанням ІВС АЕ діагностики реалізацій процесу АЕ, що вимірювався на досліджуваному зразку зі сталі Е330.

Кожна навчаюча сукупність є еліпсом

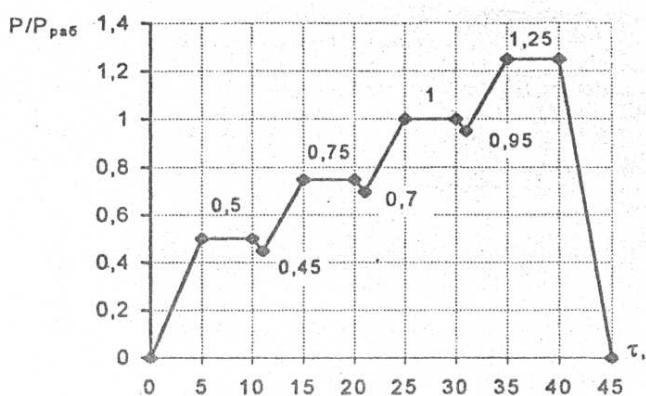


Рис. 6

розсіяння, наприклад [21, 25], побудованим на рівні 0,05 по точках, координатами яких є усереднені оцінки $\bar{\beta}_1$ і $\bar{\beta}_2$. Цифрою 1 позначені навчаючі сукупності, відповідні навантаженню $P/P_{раб} = 0,5$; 2 – $P/P_{раб} = 0,75$; 3 – $P/P_{раб} = 1$; 4 – $P/P_{раб} = 1,25$.

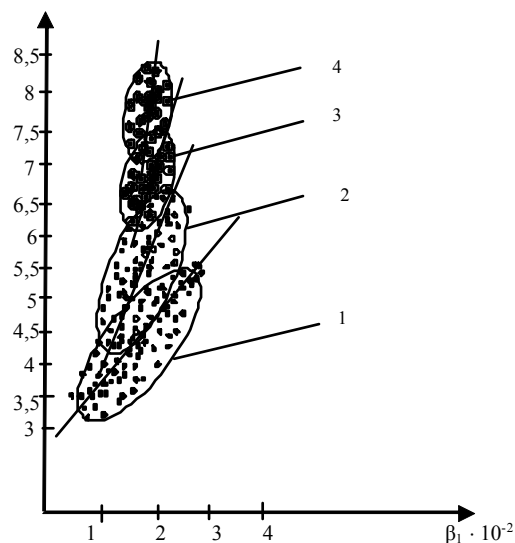


Рис. 7

Як приклад у роботі [16, 21] на основі рис. 7 для діагностики і класифікації ступеня навантаження у досліджуваному зразку побудовано *двохальтернативне* розв'язуюче правило за Нейманом-Пірсоном, яке зводиться до перевірки гіпотез:

гіпотеза H_0 : $\Theta_3 = 6,62$ – 100 % навантаження на зразок

гіпотеза H_1 : $\Theta_4 = 7,71$ – 125 % навантаження на зразок

Основним моментом при побудові цього правила є вибір помилок першого α і другого β роду, значеннями яких визначається точність і достовірність діагностики.

При побудові багаторівневої ІВС моніторингу і діагностики ЕО застосувалися результати експериментальні дані з вібрацій підшипників кочення, що випробувались на лабораторному стенді ІЕД НАН України [22, 26].

Застосування вказаного стенду дало змогу сформувати НС, які входять до відповідного блоку еталонів ІВС моніторингу і діагностики ЕО і при цьому врахувати як вид можливо-го дефекту підшипника (перекіс, відсутність мастила; дослідження пошкоджень зовнішнього або внутрішнього кільця підшипника внаслідок викришування металу, так званого пітінгу), так і швидкісний режим обертання валу установки, що дискретно змінювався в діапазоні $v_{об} \in (250, 500, 750, 1000)$ об/хв.

Для сигналів АЕ, в якості діагностичного простору для формування НС скористались діаграмою Пірсона з координатами (β_1, β_2) , де параметри β_1 та β_2 визначаються за вище вказаними співвідношеннями. На рис. 8 представлені НС в діагностичному просторі (β_1, β_2) , сформовані за результатами дослідження реалізацій процесу вібрацій підшипника кочення, що має різні технічні стани і працює у різних швидкісних режимах. Кожна навчальна сукупність являє собою еліпс розсіювання, побудований по точках, координатами яких є усереднені оцінки $\overline{\beta_1}$ і $\overline{\beta_2}$. Цифрою 1 позначена навчальна сукупність, що відповідає випробуванням умовно справного підшипника кочення; 2 – відсутнє мастило; 3 – перекіс; 4 – дефект внутрішнього кільця. Всі ці позначення збережено для НС, що сформовано для випробувань підшипника, працюючого у різних швидкісних режимах (рис. 8 а, б, в, г). Представлені на цих рисунках еліпси розсіювання були побудовані за результатами обробки від 85 до 100 вибірок експериментально вимірних реалізацій віброприскорень досліджуваних підшипників кочення, що випробовувались на установці [22, 26] і мали як різні технічні стани, так і випробовувались у різних швидкісних режимах. Кожна із наведених на рис. 8 точок відповідає одній реалізації віброприскорень підшипника кочення, що мав одне з перелічених технічних станів і випробовувався у чотирьох швидкісних режимах $v_{об} \in (250, 500, 750, 1000)$ об/хв. У свою чергу кожен із еліпсів розсіювання «покривав» своїми границями до 95 % експериментально отриманих точок, що відповідали певним умовам випробувань досліджуваних підшипників.

У відповідності зі створеною моделлю [22, 26] формування діагностичних просторів, що відповідають як певному технічному стану підшипника кочення, так і певному вищевказаному швидкісному режиму, з урахуванням (15) можна позначити як сукупність множин Ω , елементами якої є підмножини ω_{jn} , $j, n \in \overline{1, 4}$. У такому позначенні індекс j відповідає певному технічному стану підшипника при його випробуванні на установці, а n – кутовій швидкості валу установки. У даному випадку $n_1 = 250$ об/хв, $n_2 = 500$ об/хв, $n_3 = 750$ об/хв, $n_4 = 1000$ об/хв.

Просте порівняння розміщення НС на площині (β_1, β_2) показує їхню суттєву залежність як від типу дефекту, так і від швидкісного режиму роботи установки. Тобто кожній НС слід поставити у відповідність певне позначення підмножини ω_{jn} , яка б поєднувала у собі інформацію як про технічний стан досліджуваного підшипника, так і про швидкісний режим його роботи.

Цей факт дозволяє більш точно проводити діагностування технічного стану досліджуваних об'єктів, оскільки, крім параметрів β_1 та β_2 можна використовувати й інші параметри (наприклад, κ – каппа Пірсона, S та ін. [22]), що характеризують розподіл у системі кривих Пірсона.

На підставі проведених досліджень можна констатувати, що у переважній більшості експериментів відзначалося деяке збільшення (в середньому) оцінки коефіцієнта $\overline{\beta_2}$. Це пояснюється тим, що при появі дефектів (відсутність мастила, перекіс, дефекти внутрішнього кільця) в зареєстрованих реалізаціях процесу вібрацій відзначається поява імпульсів зі значною амплітудою.

Практична реалізація результатів може бути здійснена з урахуванням конструктивних особливостей генератора, що розробляється, і є основною передумовою для вибору місць розміщення первинних вимірювальних сенсорів на його корпусі. У цій статті, як приклад, розглянуто питання використання в багаторівневих ІВС моніторингу і діагностики акустоемісійних та вібраційних сигналів, що супроводжують роботу потужних генераторів у відповідності із концепцією Smart Grid.

Слід зазначити, що саме розробка, побудова і впровадження потужних генераторів вітчизняного виробництва для АЕС України має стимулювати їхнє оснащення подібними багаторівневими ІВС моніторингу і діагностики, що можуть функціонувати у відповідності із концепцією Smart Grid.

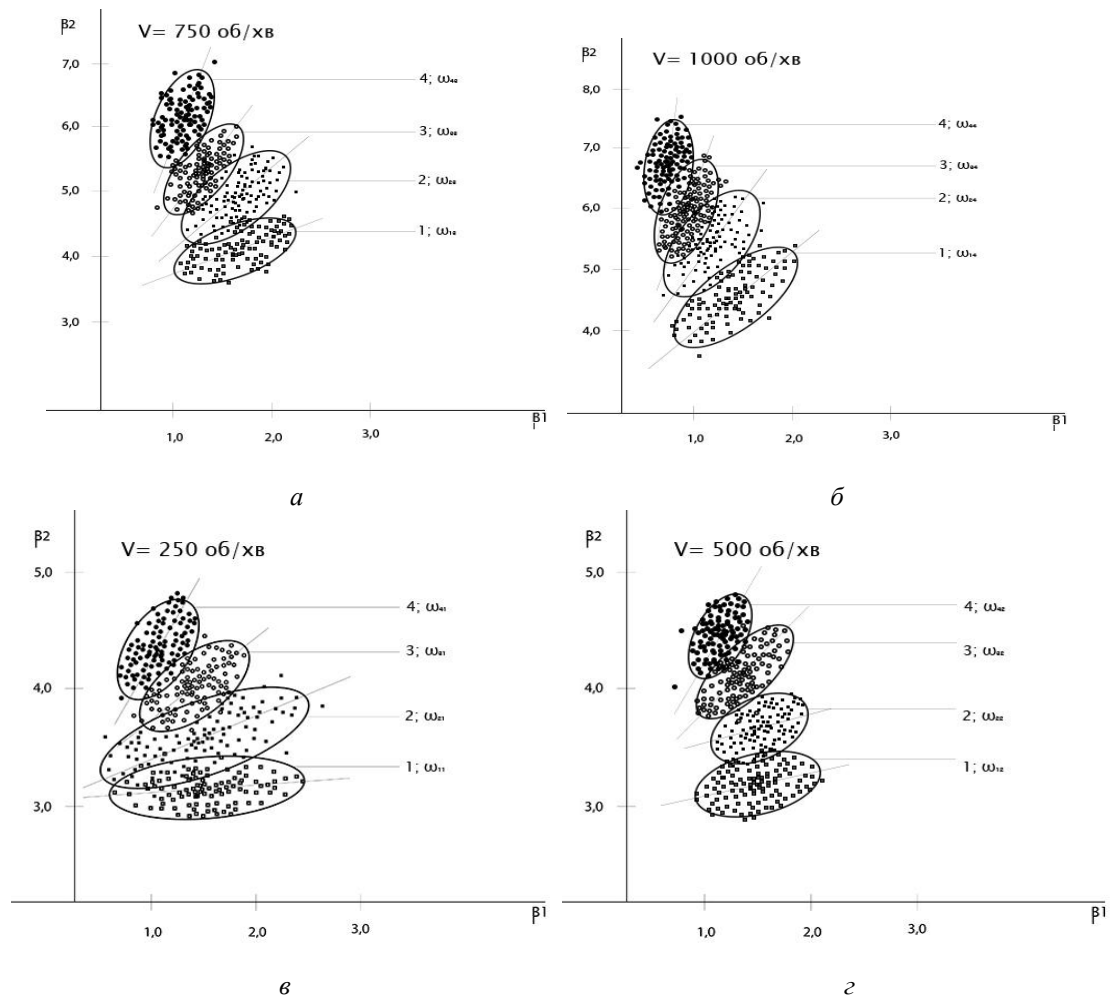


Рис. 8

Висновки. Створення і подальше впровадження на електроенергетичних підприємствах України інформаційно-вимірювальних систем моніторингу і діагностики, що працюють за концепцією Smart Grid, потребує постійного удосконалення і розвитку теоретичної бази, яка покладена в основу функціонування таких систем. Розробка інформаційного забезпечення для багаторівневих систем статистичної діагностики є найважливішою складовою, яка включає в себе і створення моделей форм представлення навчаючих сукупностей, що утворюють блок так званих еталонів у складі системи діагностування, і є одною з основних складових таких систем. У процесі досягнення сформульованої мети були отримані наступні результати:

1. дістали подальший розвиток математичні моделі діагностичних (акустоемісійних та вібраційних) сигналів, які враховують як властивості об'єкту діагностування, так і режими, у яких працює досліджуваний об'єкт;
2. за результатами аналізу математичних моделей діагностичних сигналів обґрунтовано діагностичні ознаки, які надають можливість визначати технічний стан вузлів ЕО, що працює у різних режимах;
3. запропоновано нові моделі форм представлення НС у ієрархічній структурі багаторівневої ІВС для можливої оцінки у реальному часі технічного стану вузлів ЕО, що дозволяють водночас враховувати як можливі типи дефектів досліджуваних вузлів ЕО, так і режими їхньої роботи;
4. з урахуванням результатів робіт інших авторів вказано на необхідність передбачити можливість у створюваних багаторівневих ІВС моніторингу і діагностики ЕО здійснювати моніторинг температурного стану і вологості у герметичній частині

корпусу генератора з метою запобігання зволоження ізоляції обмотки статора і наступного її електричного пробую;

5. за допомогою дослідних зразків багаторівневої ІВС моніторингу і діагностики вузлів ЕО, яка може функціонувати за концепцією Smart Grid, здійснено експериментальну перевірку працездатності і практичного застосування для розв'язку задач моніторингу і діагностування вузлів ЕО (в тому числі і вузлів перспективного потужного генератора, якій призначений для роботи у складі енергоблоків АЕС України), що може працювати у різних режимах.

Статтю підготовлено:

- за НДР «Розроблення нових математичних моделей та методів дослідження електрофізичних процесів та полів в електротехнічному обладнанні для вирішення задач його надійної експлуатації та діагностування», РК0121U107443, (КПКВК 6541030);
- за НДП «Удосконалення та розробка основного обладнання турбоагрегатів енергоблоків АЕС, у тому числі з використанням технологій малих модульних реакторів та акумулювання енергії, з метою забезпечення енергетичної безпеки та стійкого розвитку економіки України у воєнний та повоєнний періоди», РК 0123U100773, (КПКВК 6541230).

1. Мислович М.В., Сисак Р.М. Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 1. С. 78 – 85.
2. Сисак Р.М. Оптимізація алгоритмічно-програмного забезпечення автономних вимірювальних модулів розподілених діагностичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 90 – 96.
3. Мислович М.В. Моделі форм представлення навчальних сукупностей для багаторівневих систем діагностування вузлів електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 65 – 73.
4. Стогній Б.С., Кириленко, О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф. Інформаційне забезпечення задач керування електроенергетичними системами. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2012. №1. С. 13 – 22.
5. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 52–67.
6. Ильин В.В. Введение в Smart Grid. *АВОК*. 2012. № 7. С. 76 – 86.
7. S. García, J. Luengo, F. Herrera Data Preprocessing in Data Mining. Part of the Intelligent Systems Reference Library book series (ISRL, volume 72). Springer International Publishing Switzerland 2015. 327 p.
8. V.C. Gungor, Bin Lu, G.P. Hancke Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2010. Vol. 57. No. 10. P. 3557 – 3564.
9. A. Secic et al.: Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers Received May 2019, accepted June 10, 2019, date of publication June 19, 2019, date of current version July 12, 2019. P. 83915 – 83931.
10. Gui-Ping Zhou, Huan-Huan Luo, Wei-Chun Ge, Yi-Ling Ma, Shi Qiu, Li-Na Fu Design and application of condition monitoring for power transmission and transformation equipment based on smart grid dispatching control system The Journal of Engineering J. Eng., 2019, Vol. 2019 Iss. 16, pp. 2817-2821. The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018). P. 2817 – 2821.
11. Yiging Zhou, Jian Wang, Zeru Wang. Multisensor-Based Heavy Machine Faulty Identification Using Sparse Autoencoder-Based Feature Fusion and Deep Belief Network-Based Ensemble Learning. *Hindawi: Journal of Sensor*. Volume 2022, Article ID 5796505. P. 1 – 26. <https://doi.org/10.1155/2022/5796505>
12. Myslovych M., Sysak R. Design peculiarities of multi-level systems for technical diagnostics of electrical machines. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. No. 1. Pp. 47 – 50.
13. Герцик С.М. Комп'ютеризована система діагностики вузлів електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи.: автореф. дис. ... канд. техн. наук з спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2019. 20 с.
14. Кенсицький О.Г. Експлуатаційна надійність енергогенеруючого обладнання енергоблоків атомних електростанцій України. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 100 – 106.
15. Кенсицький О.Г., Ключников А.Г., Федоренко Г.М. Безопасность, надежность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС. *Ин-т проблем безопасности АЭС*, 2009. 240 с.
16. Улітко О.В. Акустоємисійна інформаційно-вимірювальна система статистичної діагностики вузлів електротехнічного обладнання.: автореф. дис. ... канд. техн. наук з спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 22 с.
17. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. Киев: Наукова думка, 1973. 192 с.
18. Марченко Б.Г., Щербак Л.Н. Линейные случайные процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1975. 143 с.
19. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследованиях процессов разрушения. Киев: Наукова думка, 1989. 176 с.

20. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов. *Технологические системы*. 2002. № 1(12). С. 26–34.
21. Улитко А.В. Особенности построения решающих правил по определению степени нагрузки в узлах электротехнического оборудования в информационно-измерительных системах диагностики. *Праці ІЕД НАНУ*. 2007. № 2 (17). С. 81 – 86.
22. Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М. Статистическая диагностика электротехнического оборудования. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 456 с.
23. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zvaritch V.N., Zaporozhets A.O. Diagnostic Systems For Energy Equipments, 2020 Springer Nature, Switzerland AG. Studies in Systems, Decision and Control book series (SSDC, volume 281), 133 p.
24. Zvaritch V., Myslovych M., Gyzhko Y. 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 2021. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 630. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_67
25. Крамер Г. Математические методы статистики. Москва: Мир, 1976. 476 с.
26. Герцик С.М. Формування навчачих сукупностей для систем діагностування електроенергетичного обладнання з урахуванням режимів його роботи. *Праці Ін-ту электродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 52. С. 54–61.

APPLICATION OF MULTILEVEL SYSTEMS FOR SOLVING PROBLEMS OF MONITORING AND DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT UNITS

Y. Gyzhko, M. Gutorova, V. Zvaritch, G. Kuzik, M. Myslovych, L. Ostapchuk, V. Titko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03680, Ukraine

e-mail: gyzhko@ukr.net, ma_gu@ukr.net, zvaritch@gmail.com, vika.ostapchuk2012@gmail.com, titko.ied@gmail.com

Features of the construction and practical application of multi-level information and measurement systems for monitoring and diagnostics of electrical equipment are considered. The results of the construction and research of mathematical models of some diagnostic signals (acoustic emission, vibrations) accompanying the operation of electrical equipment units (including powerful generators) are given. Improved mathematical models of vibrational information-diagnostic signals are proposed, taking into account both the properties of diagnostic objects and the modes in which such equipment works. According to the results of the analysis of mathematical models of the considered information signals, a number of diagnostic signs are theoretically justified, which allows monitoring and establishing the technical condition of individual generator nodes. As illustrative examples, the use of acoustoemission and vibration diagnostic signals for the formation of training sets, which are part of a multi-level information and measurement system for monitoring and diagnostics of electrical equipment, is considered. The information base obtained at the experimental test stands of the IED of the National Academy of Sciences of Ukraine was used to form such educational groups. It is pointed out the need to take into account the influence of temperature and humidity on the assessment of diagnostic signs during monitoring and diagnostics of electrical equipment. Bible 26, fig. 8.

Keywords: vibration and acoustic emission diagnostic signals, electrical equipment, monitoring and diagnostics system.

1. Myslovych M.V., Sysak R.M. About some features of the construction of intelligent multi-level systems of technical diagnostics of electric power facilities. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No. 1. Pp. 78–85. (Ukr)
2. Sysak R.M. Optimization of algorithmic software of autonomous measuring modules of distributed diagnostic systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 90–96. (Ukr)
3. Myslovych M.V. Models of forms of representation of learning populations for multi-level systems of diagnosing electrical equipment nodes. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 3. Pp. 65–73. (Ukr)
4. Stogniy B.S., Kirylenko O.V., Butkevich O.F., Sopol M.F. Information provision of power system management tasks. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2012. No 1. Pp. 13–22. (Ukr)
5. Stogniy B.S., Kirylenko O.V., Prakhovnyk A.V., Denisyuk S.P. Evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 52–67. (Ukr)
6. Piyin V.V. Introduction to Smart Grid. *AVOK*. 2012. No 7. Pp. 76–86. (Rus)
7. S. Garcia, J. Luengo, F. Herrera Data Preprocessing in Data Mining. Part of the Intelligent Systems Reference Library book series (ISRL, Vol. 72). Springer International Publishing Switzerland, 2015. 327 p.
8. V.C. Gungor, Bin Lu, G.P. Hancke Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2010. Vol. 57. No 10. Pp. 3557–3564.
9. A. Secic et al.: Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers Received May 2019, accepted June 10, 2019, date of publication June 19, 2019, date of current version July 12, 2019. Pp. 83915–83931.

10. Gui-Ping Zhou, Huan-Huan Luo, Wei-Chun Ge, Yi-Ling Ma, Shi Qiu, Li-Na Fu Design and application of condition monitoring for power transmission and transformation equipment based on smart grid dispatching control system The Journal of Engineering J. Eng., 2019, Vol. 2019 Iss. 16, Pp. 2817–2821. The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018). Pp. 2817–2821.
11. Yiging Zhou, Jian Wang, Zeru Wang. Multisensor-Based Heavy Machine Faulty Identification Using Sparse Autoencoder-Based Feature Fusion and Deep Belief Network-Based Ensemble Learning. *Hindawi: Journal of Sensor. Volume*, 2022. Article ID 5796505. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/5796505>
12. Myslovych M., Sysak R. Design peculiarities of multi-level systems for technical diagnostics of electrical machines. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 4. No. 1. Pp. 47–50.
13. Hertsyk S.M. A computerized system of diagnostics of electrical equipment nodes, taking into account the modes of its operation.: Abstract dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.05 computer systems and components. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2019. 20 p. (Ukr).
14. Kensytsky O.G. Operational reliability of energy-generating equipment of power units of nuclear power plants of Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2021. Issue 58. Pp. 100–106. (Ukr)
15. Kensytsky O.G., Klyuchnikov A.G., Fedorenko H.M. Safety, reliability and efficiency of operation of electrical and electrical equipment of NPP units. Institute of NPP Safety Problems, 2009. 240 p. (Rus)
16. Ulytko O.V. Acoustic-emission information and measurement system for statistical diagnostics of electrical equipment units.: Abstract of the dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.05 computer systems and components. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2011. 22 p. (Ukr)
17. Marchenko B.G. The method of stochastic integrals is presented and its applications in radio engineering. Kyiv: Nauk. dumka, 1973. 192 p. (Rus)
18. Marchenko B.G., Shcherbak L.N. Linear random processes and their applications. Kyiv: Nauk. dumka, 1975. 143 p. (Rus)
19. Andreykiv A.E., Lysak N.V. Method of acoustic emission in researches of destruction processes. Kyiv: Nauk. dumka, 1989. 176 p. (Rus)
20. Babak V.P., Filonenko S.F., Kalita V.M. Models of formation of acoustic emission signals during deformation and destruction of materials. *Technological systems*. 2002. No. 1(12). Pp. 26–34. (Rus)
21. Ulytko A.V. Peculiarities of constructing decisive rules for determining the degree of load in electrical equipment nodes in information and measurement systems of diagnostics. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2007. No. 2 (17). Pp. 81–86. (Rus)
22. Babak S.V., Myslovich M.V., Sysak R.M. Statistical diagnostics of electrical equipment. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015. 456 p. (Rus)
23. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zvaritch V.N., Zaporozhets A.O. Diagnostic Systems For Energy Equipments, 2020 Springer Nature, Switzerland AG. Studies in Systems, Decision and Control book series (SSDC, volume 281), 133 p.
24. Zvaritch V., Myslovych M., Gyzhko Y. 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 2021. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol 630. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_67
25. Kramer H. *Mathematical methods of statistics*. Moskva: Myr, 1976. 476 p. (Rus)
26. Hertsyk S.M. Formation of training groups for diagnostic systems of electric power equipment, taking into account its modes of operation. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2019. Issue 52. Pp. 54–61. (Ukr)

Надійшла: 12.06.2023

Прийнята: 08.10.2023

Submitted: 12.06.2023

Accepted: 08.10.2023