

**МОДЕЛІ ФОРМ ПРЕДСТАВЛЕННЯ НАВЧАЮЧИХ СУКУПНОСТЕЙ
ДЛЯ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ВУЗЛІВ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

М.В. Мислович*, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: myslmy@gmail.com

Наведено результати дослідження удосконалених математичних моделей вібраційних інформаційно-діагностичних сигналів, що враховують як властивості об'єктів діагностування, так і режими (швидкісний, електричний, температурний та ін.), у яких він працює. Розглянуто моделі представлення навчаючих сукупностей, що відповідають різноманітним технічним станам вузлів електротехнічного обладнання (ЕО) для різних режимів їхньої експлуатації. Запропоновано моделі представлення навчаючих сукупностей у вигляді матриці, елементи якої відображають еліпси розсіяння діагностичних ознак визначених типів дефектів вузлів і режимів роботи спостережуваного обладнання. Обґрунтовано структуру побудови навчаючих сукупностей за плоскою (2D) та об'ємною (3D) матрицею, елементи якої містять сукупності, що відповідають окремим вузлам ЕО, а їхнє поєднання утворює діагностичний опис електротехнічних агрегатів. Бібл. 18, рис. 5

Ключові слова: електротехнічне обладнання, система діагностики, концепція Smart Grid, навчаюча сукупність.

Вступ. Під час проведення 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. Це суттєво ускладнює структуру інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), що використовується, і, як наслідок, призводить до зниження її надійності та підвищення вартості. В певній мірі вирішити цю задачу вдається шляхом розробки та 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. При цьому передача інформації в центральний модуль діагностичної системи для її подальшого глибокого аналізу здійснюється лише за наявності обґрунтованої причини вважати, що у контрольованому вузлі 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 під час побудови систем моніторингу і діагностування електроенергетичних об'єктів все частіше використовується концепція Smart Grid. Застосування цієї концепції (в тому числі і у багаторівневих ІВС моніторингу та діагностики) передбачає, що обслуговування та ремонт ЕО повинні здійснюватися за фактичним станом [1, 5]. Для цього значно більша частина обладнання має бути охоплена системами забезпечення надійності, які здійснюють постійний чи періодичний контроль його фактичного технічного стану. Крім того, самі ці системи повинні мати більше можливостей: забезпечувати двосторонній обмін інформацією на всіх рівнях, віддалений моніторинг стану, прогнозування відмов, планування необхідності у запасних частинах, оцінку залишкового ресурсу тощо.

Інколи у відомих джерелах перелічені вище задачі об'єднують під загальною назвою “Asset Management” [1, 7]. Зараз активно ведуться як інженерні, так і наукові роботи в даному напрямку, причому їхні автори пов'язують свої результати саме з реалізацією ключових моментів концепції Smart Grid [6, 7]. Провідні виробники потужного електротехнічного обладнання вже зараз

пропонують ряд програмних продуктів, призначених для збору та узагальнення статистичної інформації щодо умов експлуатації та фактичного стану обладнання ЕО.

Потреба в оснащенні широкого класу різноманітного обладнання ЕО системами діагностування, моніторингу та контролю стану зумовлює те, що ці системи повинні бути адаптивними, значно інтелектуальнішими, ніж існуючі. Важливу роль у забезпеченні широких можливостей систем нового покоління буде відігравати розподіл обчислювальних ресурсів між різними системами діагностування, моніторингу та контролю, що працюють на різних рівнях ієрархії енергосистеми (ЕС).

Із великого різноманіття публікацій, які спрямовані на розв'язок означених вище задач, можна відмітити, наприклад, роботи [6 – 9], у кожній з яких розглянуто певні питання, пов'язані із застосуванням Smart Grid технологій.

У роботі [6] розглянуто питання попередньої підготовки експериментальних даних перед їхньою подальшою обробкою обчислювальними засобами, зокрема і за допомогою ІВС моніторингу і діагностики. У свою чергу, виконана за певними алгоритмами, що розглянуті у цій роботі, підготовка даних надає можливість скоротити їхній об'єм для подальшої обробки, що особливо важливо у разі застосування Smart Grid технологій.

Питанням забезпечення двостороннього обміну інформацією між різними рівнями об'єктів електроенергетики присвячена робота [7], де розглянуто практичне застосування бездротових сенсорів, сумісних зі стандартом IEEE 802.154 на різних електроенергетичних об'єктах. В роботі представлено результати комплексного експериментального дослідження з визначенням статистичних характеристик бездротового каналу обміну інформацією між об'єктами на електроенергетичній підстанції з напругою 500 кВ. Проведені дослідження довели перспективність використання двосторонніх сенсорів вказаного стандарту під час побудови ІВС з використанням Smart Grid технологій.

В роботі [8] розглянуто питання застосування методів моніторингу стану окремих вузлів силового трансформатора на базі використання інформаційних діагностичних сигналів. Значний інтерес являє проведена в статті класифікація певної кількості опублікованих робіт, де розглядаються питання застосування методів (частотні, часові або ін.) віброакустичної діагностики задля визначення технічного стану трансформатора, а також відмічаються особливості підходів авторів і отримані результати під час проведення такої діагностики. У цій роботі звернуто також увагу на необхідність збереження у пам'яті ІВС моніторингу і діагностики та організації швидкого доступу до діагностичних даних – навчаючих сукупностей (НС) про технічний стан досліджуваних трансформаторів, які формуються в процесі навчання такої ІВС. У свою чергу швидкий доступ до збережених у процесі навчання даних (НС) в комплексі із відповідним програмним забезпеченням надає можливість здійснити інтелектуальний підхід до оцінки стану досліджуваного ЕО.

Питання практичного застосування інтелектуальної системи D5000 для диспетчерського управління мережами розглянуто у роботі [9]. Використання цієї платформи у поєднанні із системною архітектурою і відповідним програмним забезпеченням дає змогу здійснювати оперативний моніторинг та збереження даних про технічний стан ЕО.

У роботах [1, 2, 3, 8] описано особливості побудови багаторівневих систем діагностування обладнання електроенергетичних об'єктів з урахуванням концепції Smart Grid [4, 7] і на цій основі розроблено узагальнену структуру багаторівневої системи моніторингу стану та технічного діагностування таких об'єктів. У свою чергу, використання розподілених обчислювальних ресурсів та врахування ступеня критичності дефектів різних вузлів електротехнічного обладнання у ІВС, що запропонована в [1, 3] забезпечує зниження вартості самої ІВС за одночасним збереженням високих показників точності та вірогідності виявлення дефектів за її допомогою.

Задля успішної реалізації багаторівневої системи необхідно створити модулі та відповідні блоки, що дають можливість виконувати необхідні вимірювання і 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 [10]. Слід також зазначити, що для розв'язання вказаних задач у цьому блоку мають бути розміщені навчаючі сукупності (НС), які б враховували можливі види дефектів, найбільш типові для цього вузла, та мали б відповідну інформацію щодо режимів (електричні, швидкісні, температурні та ін.) його роботи [11].

Відомо [1, 2, 4, 7, 8, 9, 12], що системи, побудовані за технологією Smart Grid, мають працювати у режимі реального часу, тобто вони повинні оперативно знаходити у блоку навчаючих

сукупностей відповідну сукупність, яка містить інформацію як про вид можливого дефекту цього об'єкту, так і режим його роботи. Вибір необхідної НС безпосередньо пов'язано з подальшим розв'язанням задачі визначення технічного стану і класифікації можливих дефектів у вузлу ЕО, що діагностується. Саме від форми представлення і систематизації НС залежить можливість функціонування системи моніторингу і діагностування ЕО за технологією Smart Grid. Отже, результати проведеного розгляду вищевказаних робіт зумовили тему даної статті.

Основною метою даної роботи є розроблення форм представлення НС, які відповідають певним технічним станам вузлів ЕО і можуть працювати у різних режимах. Передбачається також створення моделей форм НС, що дають змогу об'єднати сформовані НС в окремі вузли та агрегати ЕО у відповідності із запропонованою схемою розподілення ЕО на певні ієрархічні рівні.

Задля досягнення сформульованої мети необхідно, перш за все, розглянути деякі моменти, пов'язані з результатами розробки **математичних моделей** діагностичних інформаційних сигналів, які надали можливість обґрунтувати діагностичні ознаки, за кількісними оцінками яких, у свою чергу, було сформовано навчаючі сукупності, що відповідають як певним технічним станам вузлів ЕО, так і режимам їхньої роботи. Як приклад використаємо відомі [13] результати досліджень вібраційних діагностичних сигналів. Застосування елементів теорії лінійних випадкових процесів (ЛВП) [14, 15] під час побудови моделей цих сигналів надало можливість отримати статистичні оцінки діагностичних ознак досліджуваних вібраційних сигналів як для гаусового, так і інших видів розподілів ймовірностей, що відносяться до класу безмежно подільних законів [15].

У роботі запропоновано узагальнену математичну модель сигналу об'єкта діагностування ЕО, що працює у різних режимах та має вигляд

$$\Xi_n(t) = (\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)), \quad t \in T, \quad (1)$$

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

Модель (1) є векторним ЛВП, яка дає можливість врахувати специфіку і характерні можливості різних режимів роботи досліджуваного ЕО, та є подальшим розвитком відомих математичних моделей діагностичних сигналів, які отримано під час дослідження фізичних процесів, супроводжуваних роботою ЕО. З метою практичного використання в роботі досліджується модель стаціонарного ЛВП, яка знайшла широке застосування у вібродіагностиці технічних об'єктів і систем.

Таким чином, компонента $\xi_j(t)$ моделі (1) має інтегральне представлення [14] у вигляді

$$\xi_j(t) = \int_0^{\infty} \varphi_j(t - \tau) d\eta(\tau) = \int_0^{\infty} \varphi_j(t - \tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in T, \quad (2)$$

де детермінована функція $\varphi_j(t)$ характеризує імпульсну перехідну функцію об'єкта дослідження як лінійної системи, у j -му режимі функціонування, а породжуючий процес $\eta(t)$ – випадковий з незалежними приростами і безмежно-подільними законами розподілу, який враховує дію значної кількості стохастичних факторів, виникаючих під час формування діагностичного сигналу. Похідна процесу $\eta'(\tau)$ є процесом білого шуму [14, 15], що дає можливість використати поєднання теоретичних і експериментальних результатів досліджень у галузі вібродіагностики.

У роботі [13] досліджується конструктивна модель ЛВП (2) – багаторезонансний діагностичний вібраційний сигнал, який описується співвідношенням

$$\xi_j(t) = \sum_{i=1}^m a_{ji} \xi_{ji}(t), \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in T. \quad (3)$$

В моделі (3) для компоненти $\xi_j(t)$ використано 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, та описується наступним співвідношенням:

$$\xi_{ji}(t) = \int_0^{\infty} \varphi_{ji}(t-\tau) \eta'(\tau) d\tau, \quad (4)$$

де $\varphi_{ji}(\tau)$ – імпульсна перехідна функція формуючого резонансного i -го фільтру, яка у відповідності з методом електромеханічних аналогій [13] описується наступним чином:

$$\varphi_{ji}(t) = \frac{(2\pi f_{ji})^2}{\psi_{ji}} e^{-\beta_{ji}t} \sin(\psi_{ji}t) U(t), \quad (5)$$

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 (одичинний стрибок).

У відповідності з роботами [10, 17] та урахуванням (4) зміну технічного стану об'єкту діагностування або режиму його функціонування обумовлено змінами параметрів імпульсної функції $\varphi_{ji}(\tau)$ чи породжуючого процесу $\eta'(\tau)$. За результатами дослідження математичних моделей вібродіагностичних сигналів [10, 17] як діагностичні ознаки може бути вибрано наступну низку параметрів і характеристик, що враховують різні режими та можливий технічний стан об'єктів діагностування ЕО:

– у разі спектрально-кореляційного аналізу: коефіцієнти затухання β_{ji} ; частотні параметри ψ_{ji} , $j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$;

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

Якщо замість параметрів k та γ скористатися зв'язаними з ними параметрами $\beta_1 = k^2$ та $\beta_2 = \gamma + 3$. [13], то як діагностичний простір задля формування навчаючих сукупностей, що характеризують технічний стан досліджуваних вузлів, можна вибрати площину (β_1, β_2) , у якій будуватиметься відома в статистиці діаграма Пірсона [13]. Саме такий підхід використовувався у роботах [10, 11, 13] для формування навчаючих сукупностей, які враховують види можливих дефектів вузла ЕО.

Як зазначено вище, системи моніторингу і діагностування, побудовані за Smart Grid технологією, мають працювати у режимі реального часу, тобто така система має оперативно знаходити у банку навчаючих сукупностей відповідну сукупність, яка містить інформацію як про вид дефекту цього об'єкту, так і про режим його роботи.

Розглянемо питання розроблення моделей формування просторів діагностичних ознак, що відповідають різним технічним станам вузлів ЕО, яке працює у різних режимах (швидкість обертання ротора ЕМ, температура вузлів, що діагностуються, різні ступені електродинамічного навантаження та ін.).

У разі проведення функціональної еталонної діагностики під час формування НС (еталонів) виникає задача вибору діагностичних просторів. Згідно з [16] у сучасній математиці «... *простір* – це логічно мислена форма (або структура), яка слугує середовищем, де здійснюються інші форми та ті чи інші конструкції ...». У нашому випадку під «*простором* будемо розуміти *множину будь-яких об'єктів*, які називають його точками; ними можуть бути геометричні фігури, функції, стан фізичної системи та ін. ...».

У відповідності з [13, 17, 18] як координати діагностичних просторів зазвичай обирають параметри або функціональні характеристики діагностичних сигналів, які виявилися найбільш чутливими до зміни технічного стану досліджуваних об'єктів. Мірність діагностичного простору безпосередньо пов'язана з кількістю координат, за якими сенсорами здійснюється вимірювання діагностичних сигналів.

Позначимо простір діагностичних ознак через Ω . У разі вибору статистичних діагностичних моделей як сукупності діагностичних ознак до складу цього діагностичного простору Ω зазвичай

входять певні статистичні параметри і характеристики, які є найбільш інформативними до виявлення наявності та класифікації різних видів дефектів у вузлах ЕО.

Виходячи з цього, параметри та характеристики діагностичних сигналів можна отримувати, розглядаючи їх як реалізації випадкових процесів або полів

$$\xi(\omega) \begin{cases} \rightarrow \xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in T \\ \rightarrow \xi(\omega, r, t), \omega \in \Omega, r(x, y, z), t \in T. \end{cases} \quad (6)$$

З урахуванням обґрунтованих діагностичних ознак та режимів роботи ЕО нижче наведено схематичну ілюстрацію (рис. 1) формування НС для діагностики вузлів ЕО за допомогою створеної ІВДС. У відповідності з цією схемою саме математичні моделі діагностичних сигналів є первинною основою для теоретичного обґрунтування діагностичних ознак, тобто тих параметрів і характеристик цих сигналів, які надають найбільш вичерпну інформацію щодо технічного стану вузлів ЕО. Отримання реалізацій діагностичних сигналів може бути здійснено або шляхом статистичного моделювання, або шляхом проведення натурних експериментів на реальних електротехнічних об'єктах. Наступний крок передбачає отримання статистичних оцінок реалізацій діагностичних сигналів, які відповідають певним технічним станам вузлів ЕО та режимам їхньої роботи. Саме отримання цих статистичних оцінок, що водночас враховують технічний стан об'єкту і режим його роботи, надає можливість перейти безпосередньо до формування навчаючих сукупностей.

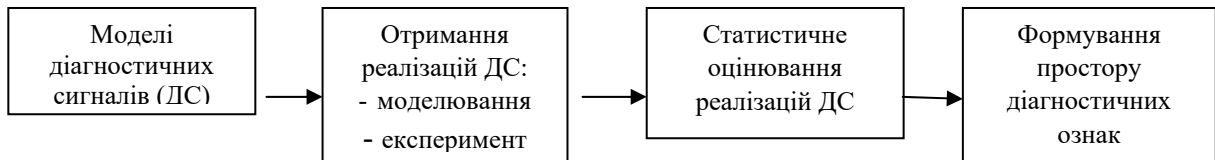


Рис. 1

Як приклад за діагностичний простір Ω задля формування НС в даній роботі обрано відомий у статистиці еліпс розсіювання. Виходячи з цього, параметри та характеристики діагностичних сигналів можна отримувати, розглядаючи їх як реалізації випадкових процесів або полів.

Враховуючи таке уявлення про вимірювання діагностичних сигналів, можна схематично показати формування діагностичного простору (рис. 2). У верхній частині цього рисунку наведено Ω – простір сукупності діагностичних ознак, які визначаються відповідними статистичними параметрами та характеристиками. Як показали багаточисельні теоретичні і експериментальні дослідження [13], серед таких параметрів найбільш інформативними є початкові та центральні моменти (кумулянти) до j -го порядку включно, а серед характеристик – кореляційна функція $R(\tau)$,

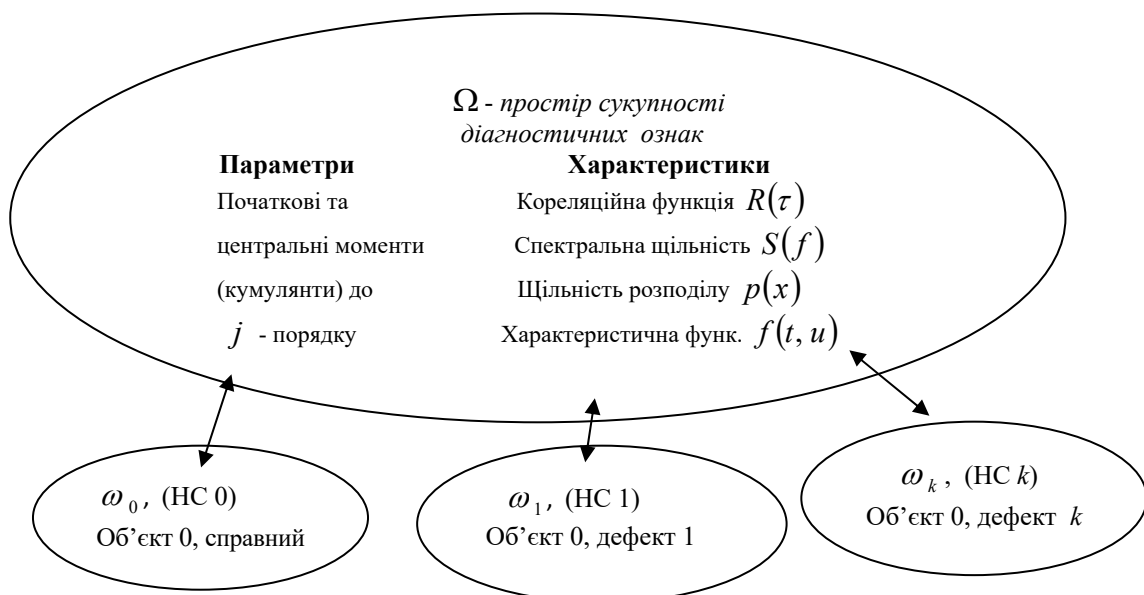


Рис. 2

спектральна щільність потужності $S(f)$, щільність розподілу ймовірностей $p(x)$ та характеристична функція $f(t, u)$.

Слід також зазначити, що формування НС здійснюється для попередньо обраного об'єкту діагностування та вузлів, що його утворюють. Причому, перелік можливих дефектів під час формування цих НС, підбирається для кожного вузлу з урахуванням його виду, конструктивних особливостей та призначення.

Також слід зазначити, що саме від вибору об'єкту (або певних вузлів, що входять до його складу) залежить інформативність тих чи інших діагностичних ознак [3, 13].

У нижній частині рис. 2 схематично наведено принцип побудови підпросторів сукупностей діагностичних ознак $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$, що відповідають справному стану об'єкту (його позначено «Об'єкт 0») або наявності певних видів дефектів (дефект 1, дефект 2, ... , дефект k) та входять до складу простору Ω , тобто

$$\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k \in \Omega. \quad (7)$$

Наведена сукупність підпросторів будується окремо для кожного з об'єктів діагностування. Умовно як приклад на рис. 2 ці підпростори побудовано для об'єкту 0, за який може бути обрано будь-який об'єкт ЕО, для якого реалізуються операції діагностування (наприклад, потужні роторні ЕМ, трансформатори, електродвигуни власних потреб тощо).

Згідно [3, 13], завершальним етапом діагностування ЕО є встановлення наявності та класифікація певних видів дефектів, які можуть виникати у досліджуваних вузлах ЕО. У вказаних роботах підкреслено, що виконання цих операцій передбачає наявність НС, які відповідають певним видам дефектів у вузлах ЕО, що діагностуються. Крім того, задля отримання достовірних результатів діагностування необхідно враховувати режим роботи ЕО. Тобто, сформовані НС мають водночас враховувати як можливі види дефектів, так і режими роботи ЕО.

Як наступний приклад на рис. 3 наведено схему утворення діагностичних просторів з НС, що відповідають вказаним вище вимогам, а саме, містять інформацію щодо можливих дефектів вузлів ЕО і режимів їхньої роботи.

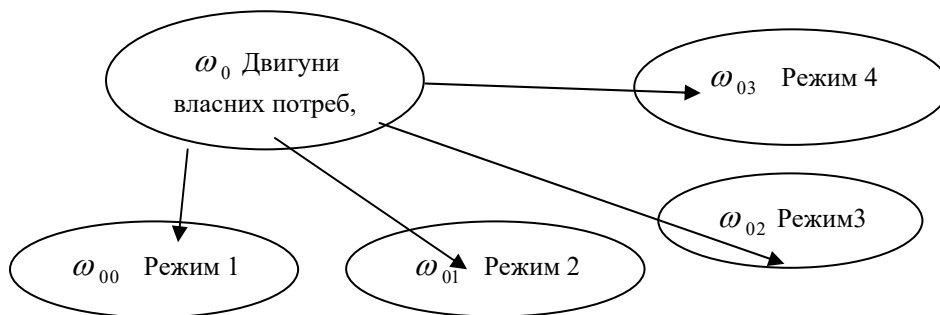


Рис. 3

У схемі на рис. 3 показано НС, сформовані для справних підшипників кочення, які входять до складу двигунів власних потреб і працюють, наприклад, у 4-х різних швидкісних режимах. Цим режимам відповідають діагностичні підпростори: $\omega_{00}, \omega_{01}, \omega_{02}, \omega_{03}$. Аналогічним чином здійснюється формування діагностичних просторів з НС і для інших видів ЕО.

Сформовану множину діагностичних просторів Ω можна представити у наступній матричній формі:

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_{00} & \omega_{01} & \dots & \omega_{0n} \\ \omega_{10} & \omega_{11} & \dots & \omega_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{k0} & \omega_{k1} & \dots & \omega_{kn} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

У (8) підпростори, що розташовані по рядках, відповідають однаковим технічним станам цього вузла, але працюючим у різних режимах, за 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 у ω відповідають індекси, які, в залежності від справного стану або певного дефекту в об'єкті, змінюються в межах від 0 до k . У свою чергу змінам режиму роботи ЕО по рядках відповідають індекси ω , які змінюються від 0 до n .

На основі побудованих моделей проведено чисельні експерименти на реальному електротехнічному обладнанні. Докладний опис цих експериментів та результати наведено у [3, 10, 11, 13].

Застосування концепції Smart Grid передбачає значне розширення можливостей систем діагностування за рахунок реалізації додаткових функцій, а саме, забезпечення двостороннього обміну інформацією між усіма ієрархічними рівнями системи, віддалений моніторинг стану досліджуваних об'єктів електростанції, оцінку залишкового ресурсу та ін. Практична реалізація таких ІВС діагностування вимагає створення відповідних методів, алгоритмів та програмного забезпечення, які б у реальному часі оброблювали вимірювані сигнали і видавали результат діагнозу щодо технічного стану досліджуваного ЕО.

Враховуючи те, що організація роботи сучасних електроенергетичних об'єктів є ієрархічною [1, 3, 12], системи моніторингу, контролю та технічного діагностування ЕО також повинні будуватися за ієрархічним принципом.

Наступним кроком у створенні НС для ІВС діагностування є умовне розбиття всього обладнання електростанції на певні ієрархічні рівні.

У відповідності з роботами [1, 3] таких рівнів ієрархії може бути вибрано чотири:

перший – на цьому рівні розташовано елементи конструкції основних вузлів обладнання електростанції. Саме цей рівень і визначає, які саме дефекти можливі в об'єкті;

другий – це власне вузли обладнання, які являють собою конструктивно єдине ціле. Сюди можна віднести обмотки ротора та статора обертових машин, магнітопроводи, підшипникові вузли, корпус, станину, фундамент, систему охолодження;

третій – представляє агрегати електротехнічного обладнання електростанції: генератори, двигуни власних потреб, трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі, ізолятори, насоси тощо;

четвертий – це рівень електростанції в цілому.

Виходячи із цього, пропонується наступна модель формування та зберігання НС для банку даних ІВС діагностування ЕО, опис якої наведено у [10].

На рис. 4 та рис. 5 наведено схеми розміщення НС у плоскій та об'ємній матричних формах. Умовно це можна назвати представлення НС у 2D-форматі (рис. 4) і 3D-форматі (рис. 5).

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

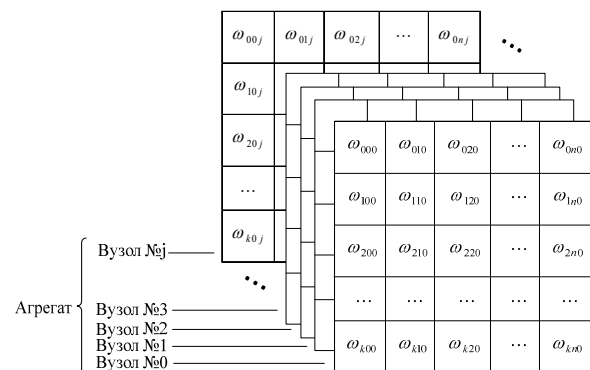


Рис. 5

Таке представлення НС дає змогу (з узгодженням запропонованих вище ієрархічних рівнів) зручно їх систематизувати по окремим вузлам і агрегатам усього ЕО електростанції та охопити системою діагностування. Так, у форматі 2D представляються НС, що охоплюють дані по одному з вузлів (це відповідає 2-му рівню запропонованої ієрархії). По стовпчиках цієї матриці розташовано елементи, що відповідають певним видам дефектів, які можуть виникати під час експлуатації досліджуваного вузла у конкретному режимі його роботи. У рядках матриці розташовуються елементи, які відповідають однаковим технічним станам (справним або маючим конкретні види дефектів), але працюючим у різних режимах.

На рис. 5 наведено об'ємну 3D-матрицю, 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, що 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 при ω відповідає номеру вузла, що входить у досліджуваний агрегат. Цей індекс змінюється у межах від 0 до j і відповідає загальній кількості вузлів в агрегаті. З урахуванням запропонованої чотирирівневої ієрархічної системи досліджуваний агрегат відноситься до 3-го ієрархічного рівня.

Запропоновані форми представлення НС у відповідних блоках навчання ІВС діагностування ЕО дають змогу організувати функціонування таких систем із залученням концепції Smart Grid.

Висновки. Створення та подальше впровадження на електроенергетичних підприємствах інформаційно-вимірювальних систем моніторингу і діагностики, що працюють за концепцією Smart Grid, потребує постійного удосконалення і розвитку теоретичної бази, яку покладено в основу функціонування таких систем. Розробка інформаційного забезпечення для багаторівневих систем статистичної діагностики є найважливішою складовою, яка включає в себе створення моделей форм представлення навчаючих сукупностей, що утворюють блок так званих еталонів у складі системи діагностування. Саме цим питанням присвячено роботу та отримано наступні результати.

1. Отримали подальший розвиток математичні моделі діагностичних сигналів, які враховують як властивості об'єкту діагностування, так і режими (швидкісний, електричний, температурний та ін.), у яких працює досліджуваний об'єкт.

2. За результатами аналізу математичних моделей діагностичних сигналів обґрунтовано діагностичні ознаки, які надають можливість визначити технічний стан вузлів ЕО, що працює у різних режимах.

3. Запропоновано нові моделі форм представлення НС у ієрархічній структурі багаторівневої ІВДС задля можливої оцінки у реальному часі технічного стану вузлів ЕО, що дають змогу водночас враховувати можливі типи дефектів досліджуваних вузлів ЕО і режими їхньої роботи.

Роботу виконано за бюджетною темою «Розробити нові моделі та методи дослідження електродинамічних процесів в електроенергетичному устаткуванні (генератори, трансформатори, двигуни власних потреб та ін.) для вирішення задач підвищення його надійності, контролю і діагностики» («КОМПЛЕКС-4»), КПКВК 6541030.

1. Myslovych M.V., Sysak R.M. About some features of construction of intellectual multilevel systems of technical diagnostics of electric power objects. *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)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.090>

3. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zvaritch V.N., Zaporozhets A.O. Diagnostic Systems For Energy Equipment. Springer Nature, Switzerland AG, 2020. 134 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3>

4. Il'yin V.V. Introduction to Smart Grid. *AVOK*. 2012. No 7. Pp. 76–86. (Rus)

5. Stogniy B.S., Kyrylenko O.V., Butkevych O.V., Sopol M.F. Information support of power systems management tasks. *Energetyka: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*. 2012. No 1. Pp. 13–22. (Ukr)

6. García S., Luengo J., Herrera F. Data Preprocessing in Data Mining. Part of the [Intelligent Systems Reference Library](#) book series (ISRL, volume 72). Springer International Publishing Switzerland, 2015. 327 p.

7. Gungor V.C., Bin Lu, Hancke G.P. Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2010. Vol. 57. No 10. Pp. 3557–3564.

8. Secic A., Krgan M., Kuzle I. Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey. *IEEE Access Digital Object Identifier. Open Access Journal: Rapid Review*. 2019. Vol. 7. Pp. 83915 – 83931.

9. 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*. 2019. Iss. 16. Pp. 2817–2821. DOI: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8456>

10. Gertsyk S.M. Computerized system for diagnostics of electrical equipment components, taking into account its modes of operation. Abstract of the Cand. of Techn. Sci. diss.: 05.13.05. Institute of electrodynamics NAN of Ukraine. Kyiv. 2019. 20 p. (Ukr)

11. Gertsyk S.M. Formation of training sets for systems of diagnostics of the electric power equipment taking into account modes of its work. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2019. Vyp. 52. Pp. 54–61. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.52.054>
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. Babak S.V., Myslovych M.V., Sysak R.M. Statistical diagnostics of electrical equipment. Kyiv: Institute of electrodynamics NAN of Ukraine. 2015. 456 p. (Rus)
14. Marchenko B.G. The method of stochastic integral representations and its applications in radio engineering. Kiev: Naukova dumka, 1973. 192 p. (Rus)
15. Marchenko B.G., Scherbak L.M. Linear random processes and their applications. Kiev: Naukova dumka, 1975. 143 p. (Rus)
16. Vinogradov I.M. Mathematical encyclopedia. Vol. 4. Moskva: Sovetskaya entsiklopediya, 1984. 1216 p. (Rus)
17. Gertsyk S.M., Myslovych M.V. Models of the formulation of the necessary sufficiency for the diagnostics of the electrical control of the operating modes of the robot. *Metrologiya ta pryklady*. 2017. No 5. Pp. 94–97. (Ukr)
18. Kluev V.V., Parkhomenko P.P., Abramchik V.E. Technical means of diagnostics: Handbook. Moskva: Mashinostroenie, 1989. 672 p. (Rus)

MODELS OF FORMS OF REPRESENTATION OF LEARNING SETS FOR MULTILEVEL SYSTEMS OF DIAGNOSIS OF ELECTRICAL EQUIPMENT ASSEMBLIES

M.V. Myslovych

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

Pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: myslmv@gmail.com

The results of consideration of improved mathematical models of vibration diagnostic signals, taking into account both the properties of the diagnostic objects and the modes (speed, electrical temperature, etc.) in which it operates are presented. Models of representation of training sets corresponding to various technical states of units of electrical equipment (EE) for various modes of their operation are considered. A models of representation of training sets in the form of a matrix, the elements of which reflect the ellipses of dispersion of diagnostic attributes of certain types of nodes defects and operating modes of the observed equipment, is proposed. The structure of constructing training sets by flat (2D) and volumetric (3D) matrix, the elements of which contain the sets corresponding to the individual components of EA, and their combination forms a diagnostic description of electrical units, is substantiated. References 18, figures 5.

Key words: electrical engineering equipment, diagnostics system, Smart Grid concept, teaching package.

Надійшла 01.02.2021

Остаточний варіант 29.03.2021