

УДК 621.31+620.9.001

**Герцик С.М.**, аспірант  
**Мислович М.В.**, докт. техн. наук, зав. відділу  
Інститут електродинаміки НАН України

**Герцык С.М.**, аспирант  
**Мыслович М.В.**, докт. техн. наук, зав. отделом  
Институт электродинамики НАН Украины

**Hertsyk S.N.**, Aspirant  
**Myslovych M.V.**, Sc.D., Chief of Department  
Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine

## **Моделі формування навчаючих сукупностей для діагностування електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи**

### **Модели формирования обучающих совокупностей для диагностирования электротехнического оборудования с учётом режимов его работы**

#### **Models of the formation of training sets for diagnosing electrical equipment, taking into account its operating modes**

***Анотація.** Запропоновано моделі побудови просторів діагностичних ознак для різних технічних станів вузлів електротехнічного обладнання, що працює у різних режимах (швидкісний, температурний, ступень навантаження тощо). На прикладах дослідження вібрацій шихтованого магнітопроводу доведена необхідність формування просторів діагностичних ознак з урахуванням режимів роботи досліджуваних об'єктів. Бібл. 7, рис. 1.*

**Ключові слова:** електротехнічне обладнання, режими роботи, навчаючі сукупності.

***Аннотация.** Предложено модели построения диагностических признаков для разных технических состояний узлов электротехнического оборудования, которое работает в разных режимах (скоростной, температурный, степень нагрузки и др.). На примерах исследования вибраций шихтованного магнитопровода доказана необходимость формирования пространств диагностических признаков с учётом режимов работы исследуемых объектов. Библ. 7, рис. 1*

**Ключевые слова:** электротехническое оборудование, режимы работы, обучающие совокупности.

***Annotation.** Models of construction of diagnostic features spaces for different technical states of units of electrical equipment operating in different modes (speed, temperature, load stage etc.) are proposed. On the examples of research of the vibrations the charged magnetic core, the necessity of forming the spaces of diagnostic features, taking into account the operating modes of the objects under study, has been proved. Ref. 7, fig. 1.*

**Key words:** electrotechnical equipment, modes of operation, training sets.

**Вступ.** На даний час в електроенергетичному комплексі України за різними оцінками, від 70 до 90% основного та допоміжного обладнання виробило свій ресурс. Останнім часом, завдяки новим інформаційним технологіям та мережі Інтернет з'явилась достатня кількість подібних методів та засобів, серед яких з найбільш ефективними є методи неруйнівного контролю, моніторингу та діагностики електротехнічного обладнання.

При визначенні технічного стану вузлів ЕО під час проведення функціональної діагностики [1, 2, 7] в даній роботі будемо використовувати еталонний підхід, тобто визначати технічний стан певних вузлів ЕО по заздалегідь побудованим еталонам (навчаючим сукупностям), що відповідають певним технічним станам досліджуваних вузлів.

**Мета** цієї роботи полягає у розробці моделей формування просторів діагностичних ознак (еталонів), що відповідають різним технічним станам вузлів ЕО, яке працює у різних режимах (швидкість обертання ротора електричної машини, температура вузлів, що діагностуються, різні ступені електродинамічного та механічного навантаження та ін.). Провести експерименти, результати яких підтверджують залежність сформованих діагностичних просторів від режимів роботи вузлів ЕО.

**Моделі формування навчаючих сукупностей, що характеризують станів вузлів ЕО.** При проведенні функціональної еталонної діагностики під час формування навчаючих сукупностей (еталонів) виникає задача вибору діагностичних просторів. Згідно [4], 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. ... ».

Згідно з [1, 5, 6], в якості координат 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, по яких сенсорами здійснюється вимірювання діагностичних сигналів.

Позначимо простір діагностичних ознак через  $\Omega$ . В разі вибору статистичних діагностичних моделей в якості сукупності діагностичних ознак до складу цього діагностичного простору  $\Omega$  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

$$\xi(\omega) \begin{cases} \rightarrow \xi(\omega, t), \quad \omega \in \Omega, \quad t \in T \\ \rightarrow \xi(\omega, r, t), \quad \omega \in \Omega, \quad r(x, y, z), \quad t \in T. \end{cases} \quad (1)$$

Враховуючи таке уявлення про вимірювання діагностичних сигналів, можна схематично показати формування діагностичного простору (рис. 1). У верхній частині рис.1 наведено  $\Omega$  - простір сукупності діагностичних ознак, які визначаються відповідними статистичними параметрами та характеристиками. Як показали [1, 5, 6] багаточисельні теоретичні і експериментальні дослідження, серед таких параметрів найбільш інформативними є початкові та центральні моменти (коммулянти) до  $j$ - порядку включно, а серед характеристик – кореляційна функція  $R(\tau)$ , спектральна щільність потужності  $S(f)$ , щільність розподілу ймовірностей  $p(x)$  та характеристична функція  $f(t, u)$ .

Згідно [1, 5] при проведенні діагностики технічного стану вузлів ЕО визначальним моментом є класифікація певних видів дефектів, які можуть виникати у досліджуваних вузлів ЕО. Слід також зазначити, що важливим моментом при формуванні еталонів (навчаючих сукупностей) таких дефектів є вибір певного об'єкту діагностування. Саме від вибору об'єкту (або певного вузлу, що входить до його складу) залежить інформативність тих чи інших діагностичних ознак [1, 5]. У нижній частині рис. 1 схематично наведено принцип побудови підпросторів сукупностей діагностичних ознак  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ , що

відповідають справному стану об'єкту або наявності певних видів дефектів (дефект1, дефект 2, ..., дефект  $n$ ) та входять до складу простору  $\Omega$ , тобто

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \in \Omega. \quad (2)$$

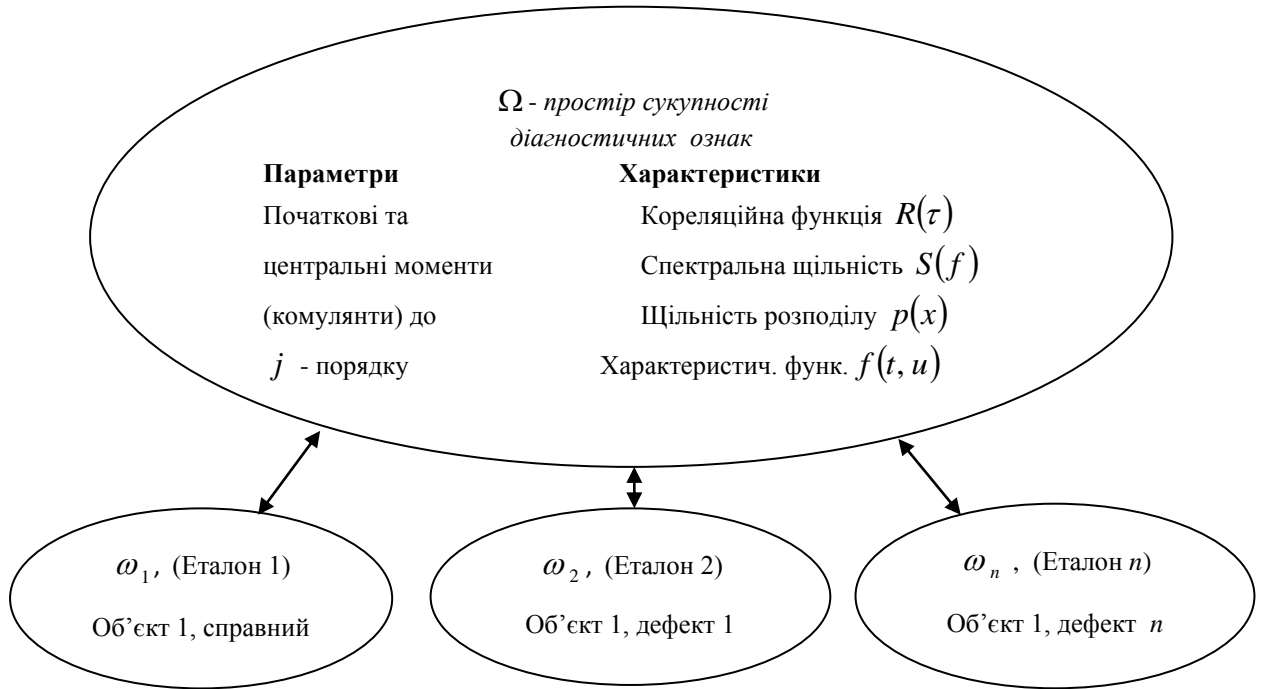


Рис. 1

Наведена сукупність підпросторів будується окремо для кожного з об'єктів діагностування. Умовно на рис.1 ці підпростори побудовані для об'єкту 1, в якості якого може бути обраний будь-який об'єкт ЕО, для реалізації операції діагностування (наприклад, потужні роторні електричні машини (ЕМ), трансформатори тощо).

Наступним кроком у створенні еталонів (навчаючих сукупностей) є умовне розбиття вибраного об'єкту діагностування на окремі складові елементи (вузли), які можуть працювати у різних режимах (швидкісний, температурний, ступень струмового або механічного навантаження тощо). Наприклад, основними елементами для роторних електричних машин є навітка, щітково-колекторний вузол, підшипники кочення (або ковзання для потужних електричних машин) тощо. Слід зазначити, що для проведення моніторингу або функціональної діагностики з високою достовірністю кожного з елементів, що входить до складу об'єктів, необхідно мати попередньо сформовані еталони.

Якщо у навчаючих сукупностях для певного об'єкту водночас враховувати як множину можливих дефектів так режимів роботи, то сформовану множину діагностичних просторів  $\Omega$  можна представити у наступній матричній формі

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{k1} & \omega_{k2} & \dots & \omega_{kn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

У наведеній формі (3) підпростори, що розташовані по рядках, відповідають однаковим режимам, у яких експлуатується досліджуване ЕО, а кожний стовпчик відповідає певному технічному стану цього вузлу. Тобто, у сукупності підмножин  $\omega_{nk}$ , індексом  $j = \overline{1, k}$  позначається певний режим роботи ЕО, а індексом  $p = \overline{1, n}$  - певний вид дефекту.

Для ілюстрації залежності кількісних оцінок діагностичних ознак від режимів роботи певних вузлів ЕО наведемо приклад одержання цих ознак для шихтованого магнітороводу. В якості інформаційного сигналу було використано вібрації поверхні магнітопроводу

Таблиця 1 містить дані з дослідження параметрів сигналу віброприскорення сегменту шихтованого магнітопроводу трансформаторів при різних струмах, що подаються у навітку цього сегменту.

Таблиця 1

| № пп | № еталону                              |  | $\omega_{11}$                                     | $\omega_{12}$  | $\omega_{13}$  |
|------|--|--|---|--|--|
|      | Режим випробувань. Діагностичні ознаки |  |   |  |  |
| 1.   | Величина струму навитки, А             |  | 2,5   | 5  | 10   |
|      | Діагностичні ознаки                    | Оцінка коеф. асиметрії $k$                                 | $0,031 \pm 3 \cdot 10^{-4}$                       | $0,029 \pm 1 \cdot 10^{-4}$                                    | $0,033 \pm 3 \cdot 10^{-4}$  |
|      |  | Оцінка коеф. ексцесу $\gamma$                              | $0,321 \pm 0,011$                                 | $0,485 \pm 0,017$  | $0,593 \pm 0,021$  |
|      |  | Кількість та оцінка основн. частотних складових $f_j$ , Гц | 2; $f_{2,5}^{(1)} = 100$<br>$f_{2,5}^{(2)} = 230$ | 3; $f_5^{(1)} = 110$<br>$f_5^{(2)} = 200$<br>$f_5^{(3)} = 270$ | 5; $f_{10}^{(1)} = 90$<br>$f_{10}^{(2)} = 120$<br>$f_{10}^{(3)} = 190$<br>$f_{10}^{(4)} = 270$<br>$f_{10}^{(5)} = 300$ |

Зміна режиму роботи, у використаному на модельному зразку здійснювалась шляхом подавання у навітку магнітопроводу через ЛАТР дискретних значень струму із наступного ряду  $I_{наб} \in (2,5; 5; 10) \text{ А}$ . Для кожного з наведених значень струму вимірювались за допомогою акселерометра АВС-017 відповідні сигнали віброприскорень шихтованого пакету магнітопроводу та із застосуванням відповідного програмного забезпечення в ІВС діагностики визначались кількісні оцінки коефіцієнтів асиметрії  $k$  і ексцесу  $\gamma$ , а також будувалась спектрограми  $S(f)$ . Слід зауважити, що всі експерименти здійснювались на шихтованому магнітопроводі, спресованому за допомогою динамометричного ключу із зусиллям 30 Н·м.

Як видно із наведених у таблиці 1 отриманих значень, зростання величини струму у навітці шихтованого магнітопроводу призводить до певного зростання кількісних оцінок коефіцієнтів ексцесу  $\gamma$ . Коефіцієнт асиметрії  $k$  у наведених умовах експерименту виявився нечутливим до зміни струмового режиму навитки магнітопроводу.

Разом з тим, результати проведених експериментальних досліджень щодо струмового режиму навитки магнітопроводу, довели інформативність спектрального аналізу досліджуваних вібрацій. А саме, підвищення струму навитки від 2,5 А до 10 А призводить до зростання кількості резонансних складових, а також до їх зміщення до області більш високих частот у навчаючих сукупностях, що сформовані при вказаних струмових навантаженнях навитки магнітопроводу.

За результатами проведених досліджень можна сформулювати наступні висновки.

1. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена необхідність врахування режимів роботи ЕО при проведенні його функціональної діагностики.
2. Розроблено модель формування навчаючих сукупностей (еталонів) для різних технічних станів вузлів ЕО та з урахуванням режимів його роботи.

3. Запропоновано представлення у матричній формі сукупності просторів діагностичних ознак, що відповідають певним режимам роботи об'єктів енергетики.

#### Перелік використаних джерел

1. *Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М.* Статистическая диагностика электротехнического оборудования. – К.: Изд-во Института электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
2. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 211 с
3. *Герцик С.М., Мыслович М.В.* Математичні моделі діагностичних сигналів, що характеризують технічний стан електротехнічного обладнання з урахуванням режимів його роботи // Матеріали XI науково-технічної конференції «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки». НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 13-14 квітня 2017 року, Київ – С.135-139.
4. Математическая энциклопедия. – М. Советская энциклопедия. (*И.М.Виноградов, С.И.Адян, П.С.Александров и др.*; под ред. академика *И.М.Виноградова*), т.4. 1984. – 1215 с.
5. *Марченко Б.Г., Мыслович М.В., Целина В.Н.* Ударная диагностика шихтованных магнитопроводов. – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины. Препринт №745. 1993. – 41 с.
6. *Мыслович М.В., Сысак Р.М.* Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів //Технічна електродинаміка. №1, 2015 – С. 78 – 85.
7. *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

1. *Babak S.V., Myslovych M.V., Sysak R.M.* Statystycheskaja dyaghnostyka elektrotekhnicheskogho oborudovanyja. – K.: Izd-vo Instytutu elektrodynamyky NAN Ukrainy, 2015. – 456 s.
2. *Byrgher Y.A.* Tekhnicheskaja dyaghnostyka. – M.: Mashynostroenye, 1978. – 211 s
3. *Ghercyk S.M., Myslovych M.V.* Matematychni modeli diaghnostychnykh syghnaliv, shho kharakteryzujutj tekhnichnyj stan elektrotekhnichnogho obladnannja z urakhuvannjam rezhyziv jogho roboty // Materialy KhI naukovo-tekhnichnoji konferenciji «Ghirotekhnologhiji, navighacija, keruvannja rukhom i konstrujuvannja aviacijno-kosmichnoji tekhniky». NTUU KPI im. Ighorya Sikorskogho, 13-14 kvitnja 2017 roku, Kyjiv – S.135-139.
4. Matematycheskaja encyklopedyja. – M. Sovetskaja encyklopedyja. (*Y.M.Vynoghradov, S.Y.Adjan, P.S.Aleksandrov y dr.*; pod red. akademyka *Y.M.Vynoghradova*), t.4. 1984. – 1215 s.
5. *Marchenko B.Gh., Myslovych M.V., Celyna V.N.* Udarnaja dyaghnostyka shykhtovanykh maghnytoprovodov. – Kyev: In-t elektrodynamyky NAN Ukrainy. Preprynt #745. 1993. – 41 s.
6. *Myslovych M.V., Sysak R.M.* Pro dejaki osoblyvosti pobudovy intelektualjnykh baghatorivnevykh system tekhnichnoji diaghnostyky elektroenerghetychnykh ob'ektiv //Tekhnichna elektrodynamika. #1, 2015 – S. 78 – 85.
7. *Stoghnyj B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnyk A.V., Denysjuk S.P.* Evoljucija intelektualjnykh elektrychnykh merezh ta jikhni perspektyvy v Ukraini // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – #5. – S. 52–67