

УДК 621.431.7:681.518.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).8](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).8)

DETERMINATION OF REGULATORY AND TECHNICAL FEATURES FOR SELECTING CONTROL AND DIAGNOSTIC PARAMETERS ON A GRAPH MODEL OF A TRANSPORT POWER PLANT POWER SUPPLY SYSTEM

ВИЗНАЧЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТУВАННЯ НА ГРАФ-МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Igor Z. Maslov
maslovigor@i.ua
ORCID: 0000-0003-1759-607

Dmytro O. Kulagin
kulagindo@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3610-4250

Vladyslav Yu. Mishchenko
m.vlad.u@i.ua
ORCID: 0000-0003-0673-2504

Vasyl F. Dievochkin
vdev@zp.edu.ua
ORCID: 0009-0003-2381-5245

І. З. Маслов¹,
канд. техн. наук, доцент

Д. О. Кулагін²,
д-р техн. наук, професор

В. Ю. Міщенко²,
канд. техн. наук

В. Ф. Дєвочкін²,
аспірант

¹ *Danube Institute of the National University “Odesa Maritime Academy”, Izmail*

² *Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia*

¹ *Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл*

² *Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя*

Abstract. Purpose. The work is aimed at solving an urgent scientific and technical problem of developing and substantiating a methodology for selecting a minimum sufficient number of control and diagnostic parameters for complex power systems. The main objective is to create a formalized approach that allows identifying the technical state of a transport power plant with high accuracy while minimizing the redundancy of information and hardware support of the monitoring system. **Method.** The research is based on the complex application of graph theory for constructing structural-topological models of energy objects. To optimize the set of diagnostic features, the distance table coverage method was applied, based on the analysis of proximity between structural defects and their manifestation in the measured parameters. The work uses multi-criteria decision-making methods to evaluate each parameter according to its physical accessibility, informativeness, and discriminative capacity. Systems analysis and decomposition methods were also applied to reduce computational complexity when working with large-scale graphs. **Results.** A mathematical model for selecting diagnostic parameters has been developed, integrating regulatory constraints and technical capabilities of measurement tools. It was found that the use of truncated syndromes based on critical distance values in the graph allows for effective filtering of insignificant connections. A five-level scale for assessing measurement accessibility has been formed, which prioritizes parameters controlled by standard instruments without interfering with the plant's design. It is proved that the proposed methodology ensures unambiguous identification of defects with a significant reduction in the total number of controlled points. **Scientific novelty.** For the first time, it is proposed to combine the distance table coverage method with multi-criteria ranking of parameters based on normalized indicators of accessibility and discriminative capacity. The approach to determining the informativeness of diagnostic features through inverted values of minimum distances in the graph model has been improved. The method of decomposing complex technical objects into unrelated subgraphs for parallel processing of diagnostic information, which allows working with systems of any complexity, has been further developed. **Practical importance.** The obtained results can be used in the design of new and modernization of existing automated monitoring systems for transport power plants. Implementation of the methodology allows for a reasoned selection of the sensor set, which reduces the cost of diagnostic equipment and the labor intensity of maintenance. The proposed approach contributes to increasing the

environmental safety of autonomous power systems operation due to the timely detection of critical failures correlating with the risks of environmental pollution.

Key words: power plant; power supply system; technical diagnostics; control; mathematical model; efficiency; electrical machines and apparatus; energy legislation.

Анотація. *Мета.* Робота спрямована на розв'язання актуальної науково-технічної задачі з розробки та обґрунтування методики вибору мінімально достатньої кількості параметрів контролю та діагностування для складних енергетичних систем. Основною ціллю є створення формалізованого підходу, який дозволяє ідентифікувати технічний стан транспортної енергетичної установки з високою точністю, мінімізуючи при цьому надмірність інформаційного та апаратного забезпечення системи моніторингу. *Методика.* Дослідження ґрунтується на комплексному використанні апарату теорії графів для побудови структурно-топологічних моделей енергетичних об'єктів. Для оптимізації множини діагностичних ознак застосовано метод покриття таблиць відстаней, що базується на аналізі близькості між структурними дефектами та їхнім відображенням у вимірюваних параметрах. У роботі використано методи багатокритеріального прийняття рішень для оцінки кожного параметра за показниками його фізичної доступності, інформативності та розподільчої здатності. Також застосовано методи системного аналізу та декомпозиції для зниження обчислювальної складності при роботі з великорозмірними графами. *Результати.* Розроблено математичну модель вибору діагностичних параметрів, яка інтегрує нормативні обмеження та технічні можливості засобів вимірювання. Встановлено, що використання усічених синдромів на основі критичних значень відстаней у графі дозволяє ефективно відсіювати несуттєві зв'язки. Сформовано п'ятирівневу шкалу оцінки доступності вимірювань, яка дозволяє пріоритизувати параметри, що контролюються штатними приладами без втручання в конструкцію установки. Доведено, що запропонована методика забезпечує однозначну ідентифікацію дефектів при суттєвому скороченні загальної кількості контрольованих точок. *Наукова новизна.* Уперше запропоновано поєднати метод покриття таблиць відстаней із багатокритеріальним ранжуванням параметрів за нормованими показниками доступності та розподільчої здатності. Удосконалено підхід до визначення інформативності діагностичних ознак через інвертовані значення мінімальних відстаней у графовій моделі. Отримав подальший розвиток метод декомпозиції складних технічних об'єктів на непов'язані підграфи для паралельної обробки діагностичної інформації, що дозволяє працювати з системами будь-якої складності. *Практична значимість.* Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових та модернізації існуючих систем автоматизованого моніторингу транспортних енергетичних установок. Впровадження методики дозволяє обґрунтовано підбирати склад датчиків, що знижує вартість діагностичного обладнання та трудомісткість технічного обслуговування. Запропонований підхід сприяє підвищенню екологічної безпеки експлуатації автономних енергосистем за рахунок своєчасного виявлення критичних несправностей, що корелюють із ризиками забруднення навколишнього середовища.

Ключові слова: енергетична установка, система електропостачання, технічне діагностування, контроль, математична модель, ефективність, електричні машини та апарати, енергетичне законодавство.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні транспортні енергетичні установки являють собою складні технічні об'єкти, що об'єднують значну кількість функціональних елементів, таких як дизельні двигуни, насоси та теплообмінні апарати. Забезпечення їхньої надійної роботи безпосередньо залежить від впровадження ефективних систем контролю та діагностування. Проте головною проблемою під час розробки таких систем є надмірність потенційно можливих параметрів контролю, оскільки їхня кількість може перевищувати сотню, що робить повне вимірювання кожного показника технічно складним і економічно недоцільним.

Додатково ситуація ускладнюється тим, що далеко не всі параметри є однаково доступними для вимірювання або достатньо чутливими до появи конкретних дефектів. Аналіз існуючих логічних, алгебраїчних та евристичних алгоритмів вибору діагностичних показників [1, 2] свідчить про їхні суттєві обмеження,

адже вони або призводять до громіздких обчислень при високій розмірності об'єкта, або не пропонують обґрунтованого критерію для вибору єдиної оптимальної множини параметрів.

З огляду на це, постає необхідність у розробці математичного підходу для формування мінімально достатньої множини визначальних параметрів, які б гарантували повну перевірку працездатності установки та ідентифікацію дефектів. Такий підхід має враховувати топологічні особливості системи електропостачання через графові моделі, де зв'язки між елементами визначаються відстанями та ступенем впливу одного вузла на інший. Водночас важливо інтегрувати багатокритеріальну оцінку, яка базується на показниках доступності контролю, інформативності та розподільчої здатності кожного конкретного параметра [1, 2].

Отже, основним завданням цього дослідження є розробка методики вибору ефективної множини

діагностичних параметрів на основі методу покриття таблиць відстаней. Це дозволить мінімізувати інформаційну надмірність при збереженні високої точності розпізнавання несправностей у складних системах транспортних енергетичних установок.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання підвищення ефективності експлуатації транспортних енергетичних установок через удосконалення систем технічного діагностування привертає увагу багатьох науковців. У сучасних публікаціях значна увага приділяється методам математичного моделювання робочих процесів [3, 4], що дозволяють виявляти відхилення в роботі обладнання на ранніх стадіях. Зокрема, дослідження у сфері технічної безпеки [5, 6] та оцінки ризиків підкреслюють важливість точного контролю параметрів вихлопних газів і паливної економічності як ключових індикаторів технічного стану двигунів внутрішнього згоряння [7].

Аналіз наукових праць [7, 8] свідчить про широке використання логічних моделей та методів теорії графів для опису структурної взаємодії елементів складних енергетичних систем. Автори багатьох досліджень зазначають, що застосування апарату теорії графів дозволяє наочно представити причинно-наслідкові зв'язки між дефектами та їхніми проявами у вигляді зміни контрольованих показників [9–11]. Проте більшість існуючих робіт фокусується на діагностуванні окремих вузлів, не приділяючи достатньої уваги проблемі мінімізації діагностичного забезпечення для системи в цілому.

Окремий напрям досліджень присвячений використанню матричних методів та таблиць функцій несправностей для вибору оптимального набору датчиків [11–13]. Незважаючи на ґрунтовність таких підходів, вони часто стикаються з проблемою обчислювальної складності при збільшенні кількості елементів установки. Крім того, у відомих публікаціях [14–16] недостатньо висвітлено питання кількісної оцінки інформативності параметрів з урахуванням їхньої доступності для вимірювання в реальних умовах експлуатації транспортних засобів.

Таким чином, незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, залишається актуальною задача розробки цілісної методики, яка б поєднувала топологічний аналіз структури об'єкта з критеріями мінімізації кількості контрольованих ознак. Саме пошуку компромісу між повнотою діагностування та економічною доцільністю вимірювальних систем присвячена дана стаття.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значну кількість існуючих алгоритмів діагностування [1, 12, 15–17], аналіз показує, що логічні та алгебраїчні методи в їхньому класичному вигляді

складно застосувати для енергетичних установок через сильний функціональний зв'язок між параметрами. Логічні алгоритми стають надто громіздкими при роботі з графами значної потужності, а евристичні підходи, хоча і звужують вихідну інформацію, часто призводять до отримання кількох рівнозначних варіантів без чіткого обґрунтування вибору єдиної оптимальної множини.

Окремою невирішеною частиною проблеми є відсутність у стандартних методах інтерактивного процесу оптимізації, який дозволяв би уникати повного перебору всіх можливих варіантів. Крім того, більшість існуючих моделей не враховує в комплексі такі критичні фактори, як фізична доступність параметра для контролю штатними приладами, його інформативність щодо конкретних дефектів та розподільча здатність при розпізнаванні несправностей.

Недостатньо дослідженим залишається і питання автоматизації вибору параметрів на основі відстаней між вершинами графової моделі, де враховується сила зв'язку між структурним пошкодженням та його відображенням у вимірюваних величинах. Саме необхідність створення формалізованої процедури, яка дозволяє обґрунтовано відсіювати несуттєві зв'язки та формувати ефективну робочу множину діагностичних ознак для складних транспортних систем, визначає актуальність цього дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є розробка та наукове обґрунтування методики визначення мінімально достатньої кількості параметрів контролю та діагностування для складних енергетичних систем на основі аналізу їхніх графових моделей. Реалізація цієї мети передбачає розв'язання задачі вибору найбільш інформативних показників технічного стану шляхом застосування методу покриття таблиць відстаней, що дозволяє формалізувати процес відбору діагностичних ознак. Це має забезпечити високу достовірність розпізнавання несправностей транспортної енергетичної установки при одночасному зниженні апаратної та інформаційної надмірності системи моніторингу, враховуючи при цьому фізичну доступність параметрів для вимірювання та їхню чутливість до виникнення дефектів у структурі об'єкта.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси контролю технічного стану та діагностування транспортних енергетичних установок, що функціонують у складі складних технічних систем.

Предметом дослідження виступають нормативно-технічні особливості та математичні моделі вибору оптимальної сукупності параметрів контролю, які забезпечують ефективне розпізнавання дефектів енергетичного обладнання.

Методи дослідження базуються на комплексному використанні апарату теорії графів для побудови структурно-топологічних моделей енергетичних систем. У роботі застосовано методи багатокритеріального прийняття рішень для оцінки ефективності параметрів за показниками їхньої доступності, інформативності та розподільчої здатності. Для мінімізації кількості діагностичних ознак використано метод покриття таблиць відстаней, що дозволяє знайти зовнішньо стійкі підмножини вершин графа. Також застосовано методи системного аналізу та декомпозиції складних об'єктів на окремі підграфи для зниження розмірності обчислювальних задач.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Загальну ситуацію для визначення множини параметрів контролю працездатності та діагностування енергетичної установки та функціонально пов'язаних з нею систем, можливо уявити в наступному вигляді. Енергетична установка та функціонально пов'язані з нею системи мають множини функціональних елементів L (дизель, теплообмінні апарати, насоси, тощо) і характеризуються множинами внутрішніх параметрів M , що складаються з підмножин R , F , E і множини дефектів D .

Введемо додаткову підмножину o внутрішніх параметрів об'єкту, котрі назвемо визначаючими, чутливими до появи того чи іншого дефекту, або несправності ($O = \{o_1, o_2, \dots, o_g\}$, $O \subset M$). Для визначення працездатності об'єкту та розпізнавання дефектів, використання всіх елементів множини o представляється нездійсненним (їх понад сотню), і непотрібним, оскільки тягне за собою отримання надлишкової інформації. Крім того, не всі параметри цих множин, як зазначалось вище, в однаковій мірі доступні та підлягають вимірюванню.

Звідси випливає, що необхідно виявити деякі множини параметрів контролю, таких, що:

$$B \subset O, \quad (1)$$

Аналіз переваг і недоліків існуючих алгоритмів діагностування дозволяє сформулювати загальні вимоги, що пред'являються до них, основні з яких:

- необхідність врахування структури топологічної граф – моделі;
- пошук рішення здійснюється за наявності ваг вершин і ребер моделі;
- точність рішення зростає в результаті інтерактивного процесу оптимізації, що дозволяє виключити громіздкі перебори.

Базовими алгоритмами є так звані логічний і алгебраїчний. Суть логічного алгоритму в знаходженні мінімальної логічної функції, представленій в кон'юнктивній нормальній формі. Мінімальній зовнішній сталій множині відповідають всі прості імліканти мінімальної диз'юнктивної нормальної форми. Логічний алгоритм в чистому вигляді застосуємо для графів

з незначною потужністю вершин і ребер. Для алгебраїчного алгоритму характерні операції над матрицею суміжності вершин графів. Якщо перетворення матриці дозволяє отримати підматриці, що містять в кожному рядку хоча б один ненульовий елемент, при перевірці на зовнішню стійкість, то стовпцям такої підматриці присвоюються інциденти вершин мінімальної зовнішньої сталої множини. Функціональні параметри енергетичної установки та функціонально пов'язані з нею системи сильно зв'язані, що ускладнює застосування даного алгоритму. Розглянувши якість цих алгоритмів з точки бачення сформульованих вимог, очевидні їх невідповідність їм.

Застосовуючи евристичний алгоритм, вводиться перенумерація вершин. Відбувається виключення «зайвих» вершин, тобто звужується вихідна інформація. Вибір чергової вершини залежить від вже відібраних вершин. При роботі алгоритму відчутне число переборів в порівнянні з попередніми алгоритмами. В результаті виходить декілька мінімальних зовнішніх сталих множин, але немає обґрунтувань для вибору єдиної.

Розглянуті алгоритми не виключають громіздких виразів, тому дослідження буде спрямоване на усунення цього недоліку. Узагальнюючи результати аналізу і використання описаних алгоритмів, можливо стверджувати, що найбільш перспективним є спрямування з використанням багатокритеріальних методів прийняття рішень. У зв'язку з цим, в роботі використаний метод покриття таблиць відстаней.

Вихідними даними для здійснення методу покриття таблиць відстаней є: математичний опис граф – моделі у вигляді матриці суміжності, інформація про показники ефективності Φ для кожної вершини моделі і відповідний цьому ранг N .

Синдром $D(e_i)$ представляє сукупність визначальних параметрів o , на значення яких впливають значення структурного параметру e_i , в основному його значення, яке не відповідає нормі – дефект. Цей вплив (або зв'язок між параметрами) визначається відстанню r між відповідними вершинами графу. Воно тим сильніше, чим ближче один до одного знаходяться вершини що розглядаються в графі. Чим більша відстань між вершинами x_i і x_j – $\rho(x_i, x_j)$, тим слабше зв'язок між вершинами x_i і x_j . При деякому значенні ρ можливо вважати зв'язок між x_i і x_j несуттєвим і надалі не розглядати (обривати зв'язок). Усічений синдром $\bar{D}_{(e)}$, по суті справи, являє ті параметри, в значеннях яких відображається відповідний дефект з достатньою силою. Об'єднання усічених синдромів утворює множина визначальних параметрів o :

$$O = \bar{D}(e_i) \cup \bar{D}(e_j) \cup \dots \cup \bar{D}(e_g). \quad (2)$$

Передбачається, що діагностичні параметри повинні бути знайдені серед визначальних параметрів, тобто $B \cdot O$. Процедура знаходження параметрів

на граф – моделі включає в себе набір послідовних кроків.

Для підграфів з α вершинами складається матриця суміжності:

$$C_{\text{вих}} = [c_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, \alpha, \quad (3)$$

де c_{ij} – коефіцієнт суміжності; $c_{ij} = 1$ – якщо ребро графу направлено з вершини i до вершини j ; $c_{ij} = 0$ – в протилежному випадку.

На основі матриць $C_{\text{вих}}$ будуються таблиці синдромів. Для цього рядок матриці суміжності A_{ei} , що представляє структурний параметр, об'єднується з рядком, що відповідає ненульовому елементу рядка A_{ei} , $j = 1, 2, \dots, k$.

$$A_{ei}^{(k)} = A_{ei} \cup \left(\bigcup_j^k A_{ej} \right), \quad (4)$$

Отриманий результат $A_{ei}^{(k)}$ об'єднується з рядком, що відповідає ненульовому елементу попереднього результату, і так далі, поки результат не перестане змінюватися. Ненульові елементи результуючого рядка $\sum e_i$, вказують склад синдрому $D(e_i)$, значення елементів представляють відстані ρ між вершиною e_i і іншими вершинами синдрому $D(e_i)$.

При об'єднанні рядків значення їх ненульових елементів підсумовуються послідовно. Якщо будь – який рядок має кілька ненульових елементів, то результуючий синдром визначається як $D(e_i) = \bigcup_j D^{(j)}(e_i)$.

Знайдені синдроми і вектор – рядки $\sum C(e_i)$ зводяться в таблицю синдромів $D(e_i)$.

Визначення усічених синдромів $\bar{D}(e)$ проводиться шляхом викреслення з вектор – рядка $\sum C(e_i)$ ненульових елементів, значення яких більше $\rho_{\text{кр}}$ з подальшим коригуванням складу синдромів $D(e_i)$, відповідним усіченим компонентам досяжності ($\bar{e}$). Вибирається критичне значення відстані в медіанному інтервалі по гістограмі всіх маршрутів. З використанням таблиці синдромів будується матриця усічених синдромів.

З використанням таблиці синдромів будується матриця відстаней ρ .

Для цього по таблиці синдромів для кожного $D(e_i)$ або $D^{(j)}(e_i)$ утворюють маршрут, послідовно відзначаючи вершини (ненульові елементи) в порядку зростання значень відстані ρ . Відстань $\Delta(a, b) = \rho(a, b)$ характеризується наступною функцією:

$$\Lambda[\rho(\alpha_i, \alpha_n)] = \sum_{i=0}^{n-1} \sigma(\alpha_i, \alpha_{i+1}), \quad (5)$$

де $\rho(\alpha_i, \alpha_n)$ – довжина звичайного орієнтованого ланцюга, в якій кожна з вершин, включаючи a і b , зустрічається тільки один раз; $\sigma(\alpha_i, \alpha_{i+1})$ – число орієнтованих ребер, що з'єднують вершини α_i та α_{i+1} .

З використанням таблиці відстаней будується матриця близькості $\bar{\rho}$. Для цього ненульові елементи (значення ρ , при цьому $\rho \leq \rho_{\text{кр}}$) з таблиці відстаней замінюються значеннями $\bar{\rho}$, розрахованими як:

$$\bar{\rho}(d_j, x_i) = \rho_{\text{max}} + \rho_{\text{min}} - \rho(d_j, x_i). \quad (6)$$

У таблицю близькості зводяться результати розрахунку показника ефективності Φ , необхідні для ранжирування параметрів.

Показник ефективності Φ_i розглядається у вигляді лінійної функції оцінок кожного i -го параметру відповідно до виразу:

$$\Phi_i = \alpha \cdot \lambda_i^* + \beta \cdot \Omega_i^* + \gamma \cdot \psi_i^*, \quad (4.7)$$

де α, β, γ – коефіцієнтами значущості, $\alpha + \beta + \gamma = 1$; $\lambda_i^* = \lambda_i / \lambda_{\text{max}}$, $\Omega_i^* = \Omega_i / \Omega_{\text{max}}$, $\psi_i^* = \psi_i / \psi_{\text{max}}$ – нормована оцінка параметрів вершин граф – моделі за показником доступності контролю, інформативності і розподільчої здатності.

Число λ_i , характеризує доступність параметру для контролю, визначається за спеціально розробленою шкалою (табл. 1), яка включає в себе ряд ситуацій, що визначають вимірність (здатність спостерігати за параметром). Для оцінки параметрів вершин граф – моделі за показником λ_i , в шкалу ввели п'ять ситуацій контролю, абсолютна оцінка яких встановлюється в діапазоні значень від 5 до 0, а відносна – від 1 до 0.

Оцінка параметрів по чутливості та інформативності Ω , визначається виходячи з таких співвідношень. Параметр вважається тим інформативніше, чим від більшої кількості значень структурних параметрів (множина E) залежить його значення, і тим більш чутливим до порушення нормальної роботи, чим тісніше зв'язок між ним і структурними параметрами. Стосовно до граф – моделі, показник Ω буде мати більше значення для вершин, досяжних з більшого числа вершин при менших значеннях відстаней $\rho = \rho_{\text{min}}$. Оцінка Ω вершини по інформативності визначається з виразу:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^t \bar{\rho}_j(d_j, x_i), \quad (8)$$

де t – кількість дефектів d (множина D), від зображення яких досяжна вершина x_i по графу з відстанню по маршруту $\rho \leq \rho_{\text{кр}}$, або кількість дефектів, що містяться в усіченому компоненті досягнення $\bar{R}(x_i)$ вершини x_i ; $\bar{\rho}(d_j, x_i)$ – інвертоване значення мінімальних відстаней маршрутів компонентів $\bar{R}(x_i)$ з елементів (d_j) та (близькість значень елементів (d_j) та (x_i)).

Розподільчу здатність ψ параметру x_i при розпізнаванні дефектів зручно оцінювати по числу t_i дефектів D , від зображення яких досяжна по графу відповідна вершина x_i . Найкращою розподільчою

Таблиця 1. Шкала оцінок параметрів за показником доступності виміру

Характеристика ситуації	λ_i	λ_i^*
1. Параметр може бути визначений за використанням штатного приладу, вже встановленого на автономній системі	5	1
2. Параметр може бути виміряний без доопрацювання конструкції енергетичної установки та технічно пов'язаних з нею інших систем (наприклад, є бонки, технологічні отвори і так далі) з використанням приладів аналогічних штатним, не має потреби в спеціальній контрольній апаратурі (не треба розробляти спеціальну вимірювальну апаратуру)	4	0,8
3. Параметр може бути виміряний з незначною доробкою енергетичної установки та технічно пов'язаних з нею інших систем або з використанням в достатній мірі компактної, простої в експлуатації спеціальної вимірювальної апаратури що швидко встановлюється	3	0,6
4. Для виміру параметру необхідно здійснювати більш істотне доопрацювання дизель – генераторної установки, застосовувати спеціальну, не в повній мірі компактну і складну в використанні контрольну апаратуру, незначні демонтажні – монтажні роботи безпосередньо на автономній системі об'єкту	2	0,4
5. Параметр в принципі може бути виміряний, але це потребує здійснення значних демонтажних – монтажних робіт безпосередньо на автономній системі об'єкту, складних у всіх відносинах вимірювальних приладів, якщо такі в принципі є (не простий випадок), але його можливо здійснити в процесі регламентних робіт	1	0,2
6. При існуючих засобах вимірювання, наявних на даний момент (або взагалі), параметр не може бути виміряний, або це потребує зняття вузла або агрегату з транспортної дизель-генераторної енергетичної системи	0	0

здатністю ($\psi = 1$) володіє параметр, якщо відповідна йому вершина досяжна з одного дефекту. Найгіршою з можливих для даного завдання розподільчою здатністю володіє параметр, досяжний від найбільшого числа (або від всіх) дефектів ($\psi = 0$), які підлягають розпізнаванню. З цих умов ψ визначається відповідно до співвідношення:

$$\psi_i = (t_{\max} - t) / (t_{\min} - t), \quad (9)$$

де $t_{\max}$ – максимальне число дефектів, від зображення яких досяжна будь – яка вершина графа.

Після визначення оцінок λ , Ω , і ψ для кожної вершини слід нормувати значення λ , Ω , і ψ , привівнюючи їх максимальні значення до одиниці.

Значимість факторів умов вимірювання параметрів, чутливості до порушення нормальної роботи і розподільчої здатності враховуються коефіцієнтами значимості α , β і γ .

Вершинам присвоюється номер N відповідно до убудування значень Φ .

Для безпосереднього вибору елементів множин параметрів, що контролюються, знаходиться покриття таблиці відстаней $\bar{p}$. Таблиці покриття будуються на основі таблиць близькості відповідно до здійсненого упорядкування вершин. Таблиця покриття може розглядатися як двочастковий граф L , де існує бінарне відношення v між елементами двох множин: множини дефектів D і множини X вершин графу. Тому математична задача покриття таблиці відстаней вирішується відшукуванням мінімальних ззовні стійких підмножин – T орієнтованого графу, таких, для яких $T \subseteq X$ істинне висловлювання:

$$\forall_x [x \in X, x \in T(\Gamma_x \cap T \neq \emptyset)], \quad (10)$$

де T – підмножина, утворена відображенням вершини x в множині X ; $\forall_x$ – квантор спільності.

В результаті отримали схему покриття підграфів у вигляді дводольного графу, що дозволяє приступити до вибору найбільш ефективної підмножини. Знайдене в такий спосіб покриття, являє собою шукану множину діагностичних параметрів B .

Метод покриття таблиці відстаней, в завданні знаходження ефективної множини діагностичних параметрів, базується на оцінці елементів моделі – визначенні ваг вершин і ребер, впорядкування вершин відповідно до значень показника ефективності і в знаходженні маршрутів відображення дефектів в графі, а також на використанні методів знаходження покриттів таблиць. Це відповідає знаходженню ззовні стійкої підмножини для вершин дводольного графу.

У вирішенні цього завдання, в якості вихідної, є інформація про показники ефективності Φ кожної вершини моделі, її порядковий номер після впорядкування, а також таблиця відстаней (близькості) $\bar{p}$.

Послідовність дії при знаходженні покриває дефекти множин параметрів, які представляється в наступному вигляді.

На основі таблиці близькості будується таблиця покриття відповідно до здійсненої упорядкованої вершини. Елементи множини Z розташовуються по вертикалі відповідно до убудування значень показника ефективності Φ . Визначається кількість ненульових елементів l_j кожного стовпця. Якщо $\forall d_j [d_j \in D]$, $l_j \neq 0$, розглядають перший по порядку (зліва направо) стовпець d_j , у якого $l_j = l_{\min}$. До складу множини діагностичних параметрів B включається елемент $z_j \in Z$, рядок якого містить ненульовий елемент на перетині зі стовпцем d_j .

Далі з таблиці покриття відстаней подумки викреслюють рядок z_j , стовпець d_j і стовпці, яким відповідні дефекти d_v , $v \neq 1$ також покриваються контролем ввімкненого в множину B параметру z_j , тобто

стовпці, що мають ненульові елементи на перетині з рядком z_i . При цьому дефект dv вважається покритим тільки тоді, коли в стовпці dv вище рядки z_i немає ненульового елемента, значення $\bar{\rho}$ якого більше аналогічного значення для елемента стовпця на перетині з рядком z_i . В іншому випадку дефект dv вважається непокритим і стовпець не викреслюється.

Для тих елементів, що залишилися, z_σ множини Z , рядки яких мають елементи на перетині з викресленими стовпцями, причому або $\bar{\rho}(d_j, z_\sigma) \leq \bar{\rho}(d_j, z_i)$ або $\bar{\rho}(d_v, z_\sigma) \leq \rho(d_v, z_i)$ перераховують показники Ω і Φ відповідно до раніше викладеної методики. Якщо обраний для z_i є симптомом первинного параметру x_i і при констатації z_i одночасно визначається наявність або відсутність деякого іншого симптому z_j , $\phi \neq 1$ параметру x_j , то до складу B одночасно з z_i включається також z_ϕ з подальшим виконанням стандартних дій. У множині B включається той з двох елементів z , у якого значення Φ більше (що знаходиться вище).

В результаті маємо схему покриття у вигляді дводольного графу, і можемо приступити до вибору найбільш ефективної підмножини.

Знайдене в такий спосіб покриття являє собою шукану множину діагностичних параметрів B . З множин покриттів, що існують для таблиці, знайдене є ефективним при дотриманні вимог. Виявлені таким чином діагностичні параметри можуть бути покладені в основу вирішення задачі діагностування.

При моделюванні складних об'єктів, з великою кількістю складових частин і взаємозв'язків між ними, для обробки моделі може виникнути завдання декомпозиції. Декомпозиція складного об'єкту дозволяє спростити використання методів обробки моделі. Суть такої декомпозиції полягає у виділенні окремих підмоделей.

Граф – модель об'єкту діагностування часто виходить дуже складною з огляду на великі потужності множин вершин X та ребер U . Це ускладнює її використання. Доцільно зменшити розмірність вирішуваних завдань шляхом поділу граф – моделі на декілька частин. Підграф G_{ij} графу G_i – це граф, що містить підмножину вершин X_{ij} множини вершин X_i графу G_i , тобто $X_{ij} \subset X_i$ разом з усіма ребрами що їх з'єднують. Підграфи G_{ij} і G_{ik} графу G_i будемо називати не пов'язаними між собою, якщо з вершини підграфу G_{ij} не можливо досягти жодної вершини підграфу G_{ik} і навпаки.

Виділення підграфів дозволяє розглядати їх незалежно один від одного, в тому числі і включати етап знаходження діагностичних параметрів. Тоді, множина діагностичних параметрів об'єкту в цілому визначається об'єднанням результатів обробки кожного, не пов'язаного підграфу, окремо, тобто:

$$B = B_i \cup B_j \cup \dots \cup B_n. \quad (11)$$

Складніше йде справа у випадках, коли до початкової робочої граф – моделі застосована процедура

декомпозиції на пов'язані між собою підграфи. На практиці досліднику надається можливість самому обирати шлях вирішення. Так, якщо включення в множини B надлишкових параметрів не настільки істотно, пов'язані між собою підграфи можливо обробляти за методом незв'язаних підграфів із застосуванням виразу (11).

Законодавчий аспект вибору параметрів контролю для систем електропостачання транспортних енергетичних установок базується на пріоритетності екологічної безпеки та мінімізації ризиків антропогенного забруднення водних акваторій. Державні нормативні акти встановлюють жорсткі вимоги до моніторингу технічного стану дизель-генераторних установок, оскільки їхня некоректна робота безпосередньо корелює з рівнем екологічної небезпеки. Відповідно до галузевих стандартів, формування граф-моделі об'єкта повинно включати параметри, що підлягають обов'язковому контролю згідно з правилами технічної експлуатації та вимогами міжнародних конвенцій щодо запобігання забрудненню з суден.

Технічне нормування процедури відбору параметрів на граф-моделі спирається на розроблену шкалу оцінок доступності вимірювань, яка відповідає чинним метрологічним нормам. Законодавчо визначено, що першочерговими для контролю є параметри, які можуть бути визначені за допомогою штатних приладів, встановлених на автономній системі. Це відповідає найвищому нормативному рангу доступності та мінімізує втручання в сертифіковану конструкцію енергетичної установки.

Для параметрів, що потребують доопрацювання конструкції або використання спеціальної переносної апаратури, нормативні вимоги передбачають проведення вимірювань під час регламентних робіт. У випадках, коли для отримання діагностичної інформації необхідне зняття вузла або агрегату, такий параметр класифікується як найменш придатний для оперативного контролю, що відображається нульовим показником у системі ранжування. Таким чином, математична модель вибору підмножини діагностичних ознак безпосередньо інтегрує нормативні обмеження щодо трудомісткості та технологічної можливості проведення замірів.

Важливим нормативним критерієм є розподільча здатність параметрів, яка визначає спроможність системи чітко ідентифікувати конкретний дефект серед множини можливих несправностей. Згідно з принципами технічного регулювання, найкращою визнається така конфігурація системи діагностування, де обраний параметр однозначно вказує на конкретне пошкодження структури об'єкта. Поєднання цих законодавчо обумовлених вимог із методом покриття таблиць відстаней дозволяє створити нормативно обґрунтовану та технічно ефективну систему моніторингу транспортної енергетичної установки.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Запропонований підхід до вибору параметрів контролю та діагностування базується на інтеграції структурно-топологічного аналізу енергетичної установки та багатокритеріальної оцінки ефективності кожного показника. На відміну від класичних логічних чи алгебраїчних алгоритмів, які при великій кількості елементів стають надто громіздкими, використання методу покриття таблиць відстаней дозволяє значно спростити процедуру пошуку оптимальної підмножини діагностичних ознак. Це досягається шляхом формалізованого відсікання несуттєвих зв'язків, коли відстань між дефектом та параметром перевищує встановлене критичне значення.

Ключовим аспектом обговорення є впровадження комплексної оцінки ефективності, що враховує не лише математичну інформативність, а й реальні умови експлуатації. Застосування розробленої шкали доступності дозволяє віддавати пріоритет параметрам, які вимірюються штатними приладами, що відповідає нормативним вимогам до надійності та економічності систем моніторингу. Такий підхід мінімізує потребу в значних демонтажно-монтажних роботах, які згідно зі шкалою мають найнижчі бали через високу трудомісткість.

Результати моделювання підтверджують, що використання показників чутливості та розподільчої здатності дозволяє ідентифікувати дефекти з високою точністю. Найкращу оцінку отримують ті параметри, які мають мінімальну відстань до джерела несправності та здатні однозначно вказати на конкретний дефект. Водночас процедура декомпозиції складного графа на непов'язані підграфи доводить свою ефективність як інструмент зниження розмірності задачі, що дозволяє обробляти моделі великих транспортних енергетичних установок без втрати якості діагностування.

Таким чином, сформована методика забезпечує перехід від надлишкового контролю до вибіркового, але достатнього моніторингу. Це дозволяє не лише знизити вартість діагностичного обладнання, а й підвищити

загальний рівень екологічної та технічної безпеки за рахунок оперативного виявлення критичних відхилень у роботі системи електропостачання.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження розроблено науково-методичний підхід до визначення нормативно-технічних особливостей вибору параметрів контролю та діагностування для систем електропостачання транспортних енергетичних установок. На основі аналізу граф-моделей об'єктів встановлено, що ефективність діагностичного забезпечення залежить від врахування топологічної структури системи та ієрархії взаємозв'язків між її елементами.

Застосування методу покриття таблиць відстаней дозволило формалізувати процедуру відбору мінімально достатньої множини діагностичних параметрів, що забезпечує повне розпізнавання заданої множини дефектів. Впровадження комплексної оцінки ефективності параметрів за критеріями доступності, інформативності та розподільчої здатності дало змогу пріоритизувати використання штатних засобів контролю, що відповідає нормативним вимогам до експлуатації транспортних засобів.

Доведено, що використання усічених синдромів та встановлення критичних значень відстаней між вершинами графа дозволяє значно знизити інформаційну надмірність системи без втрати достовірності діагностування. Запропонована процедура декомпозиції складної моделі на непов'язані підграфи підтвердила свою спроможність спрощувати обчислювальні алгоритми при роботі з великорозмірними енергетичними об'єктами.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх використання для проектування автоматизованих систем моніторингу, які забезпечують високий рівень екологічної безпеки та надійності транспортних енергетичних установок. Розроблена методика дозволяє обґрунтовано формувати склад діагностичного забезпечення, мінімізуючи витрати на вимірювальну апаратуру та технічне обслуговування.

REFERENCES

- [1] Peng, H., Long, F., & Ding, C. (2005). Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(8), 1226–1238. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.159>
- [2] Gao, Z., Cecati, C., & Ding, S. X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3757–3767. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2417501>
- [3] Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – A review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4), 719–729. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955>
- [4] Wen, L., Li, X., Gao, L., & Zhang, Y. (2018). A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5990–5998. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777>
- [5] Shao, S., McAleer, S., Yan, R., & Baldi, P. (2019). Highly accurate machine fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2446–2455. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2864759>
- [6] Preparata, F. P., Metze, G., & Chien, R. T. (1967). On the connection assignment problem of diagnosable systems. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, EC-16(6), 848–854. <https://doi.org/10.1109/PGEC.1967.264748>

- [7] Guo, L., Lei, Y., Xing, S., Yan, T., & Li, N. (2019). Deep convolutional transfer learning network: A new method for intelligent fault diagnosis of machines with unlabeled data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 7316–7325. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2877090>
- [8] Lei, Y., Jia, J., Lin, J., Xing, S., & Ding, S. X. (2016). An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(5), 3137–3147. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2519325>
- [9] Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., & Capolino, G.-A. (2008). Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), 4109–4126. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527>
- [10] Wen, L., L. Gao, & Li, X. (2019). A new deep transfer learning based on sparse auto-encoder for fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(1), 136–144. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2754287>
- [11] Jiang, G., He, H., Yan, J., & Xie, P. (2019). Multiscale convolutional neural networks for fault diagnosis of wind turbine gearbox. *Transactions on Industrial Electronics*, 66(4), 3196–3207. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2844805>
- [12] Zhang, X.-M., Han, Q.-L., Wang, X., & Ge, X. (2020). Networked control systems: A survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911651>
- [13] Dai, X., & Gao, Z. (2013). From model, signal to knowledge: A data-driven perspective of fault detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(4), 2226–2238. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2243743>
- [14] Tang, L., & Ooi, B.-T. (2007). Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1877–1884. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899276>
- [15] Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., Pusca, R., Estima, J., Riera-Guasp, M., & Hedayati-Kia, S. (2014). Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 31–42. <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651>
- [16] Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., & Teneketzis, D. C. (1996). Failure diagnosis using discrete-event models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4(2), 105–124. <https://doi.org/10.1109/87.486338>
- [17] Hu, X., Zhang, K., Liu, K., Lin, X., Dey, S., & Onori, S. (2020). Advanced fault diagnosis for lithium-ion battery systems: A review of fault mechanisms, fault features, and diagnosis procedures. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(3), 65–91. <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.2964814>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Peng, H., Long, F., & Ding, C. (2005). Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(8), 1226–1238. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.159>
- [2] Gao, Z., Cecati, C., & Ding, S. X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3757–3767. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2417501>
- [3] Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – A review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4), 719–729. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955>
- [4] Wen, L., Li, X., Gao, L., & Zhang, Y. (2018). A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5990–5998. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777>
- [5] Shao, S., McAleer, S., Yan, R., & Baldi, P. (2019). Highly accurate machine fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2446–2455. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2864759>
- [6] Preparata, F. P., Metze, G., & Chien, R. T. (1967). On the connection assignment problem of diagnosable systems. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, EC-16(6), 848–854. <https://doi.org/10.1109/PGEC.1967.264748>
- [7] Guo, L., Lei, Y., Xing, S., Yan, T., & Li, N. (2019). Deep convolutional transfer learning network: A new method for intelligent fault diagnosis of machines with unlabeled data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 7316–7325. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2877090>
- [8] Lei, Y., Jia, J., Lin, J., Xing, S., & Ding, S. X. (2016). An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(5), 3137–3147. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2519325>
- [9] Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., & Capolino, G.-A. (2008). Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), 4109–4126. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527>
- [10] Wen, L., L. Gao, & Li, X. (2019). A new deep transfer learning based on sparse auto-encoder for fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(1), 136–144. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2754287>
- [11] Jiang, G., He, H., Yan, J., & Xie, P. (2019). Multiscale convolutional neural networks for fault diagnosis of wind turbine gearbox. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(4), 3196–3207. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2844805>
- [12] Zhang, X.-M., Han, Q.-L., Wang, X., & Ge, X. (2020). Networked control systems: A survey of trends and techniques. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(1), 1–17. <https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911651>
- [13] Dai, X., & Gao, Z. (2013). From model, signal to knowledge: A data-driven perspective of fault detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(4), 2226–2238. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2243743>
- [14] Tang, L., & Ooi, B.-T. (2007). Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1877–1884. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899276>

- [15] Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., Pusca, R., Estima, J., Riera-Guasp, M., & Hedayati-Kia, S. (2014). Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 31–42. <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651>
- [16] Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., & Teneketzis, D. C. (1996). Failure diagnosis using discrete-event models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 4(2), 105–124. <https://doi.org/10.1109/87.486338>
- [17] Hu, X., Zhang, K., Liu, K., Lin, X., Dey, S., & Onori, S. (2020). Advanced fault diagnosis for lithium-ion battery systems: A review of fault mechanisms, fault features, and diagnosis procedures. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(3), 65–91. <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.2964814>



© Маслов І. З., Кулагін Д. О., Міщенко В. Ю., Дєвочкін В. Ф.

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)