

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Тимофєєв К. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики», Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtimofeev2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8668-6159;

Вороненко С. В., к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3880-9556;

Лебеденко Ю. О., к.т.н., доцент, доцент кафедри «Інформаційні та комп'ютерні технології» Київського національного університету технологій та дизайну, e-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.

Стаття присвячена питанням розвитку методів діагностування високовольтних електричних машин та їх практичному застосуванню на морському транспорті. Дослідження основних підходів до розробки методів і засобів діагностування електричних машин показало доцільність застосування принципів функціонального діагностування. Аналіз діагностичних параметрів дозволив сформулювати ефективну сукупність параметрів вібрації, температури, споживаного і смісного струму, а також електророзрядної активності та запропонувати комплексну функціональну систему діагностування. Розроблено алгоритм функціонального діагностування суднових високовольтних електричних машин. Запропоновано структуру системи діагностування технічного стану, що дозволяє реалізувати розроблений алгоритм діагностування, який відрізняється конструктивною простотою і надійністю. Діагностування високовольтної електричної машини може бути формалізовано за допомогою моделей класифікації технічного стану і пошуку несправностей за результатами класифікації. Розроблено нечітку модель класифікації технічного стану у вигляді предикатних правил, що дозволяє за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності і середньоквадратичного значення віброшвидкості визначити технічний стан об'єкта. Визначено п'ять класів технічного стану об'єкта: «Норма», «Норма з відхиленнями», «Норма зі значними відхиленнями», «Погіршення» або «Передаварійне». Розроблена модель пошуку несправностей застосовує апарат нечіткої логіки. Модель дозволяє виявити несправності об'єкта по виміряним значенням амплітуд струму і вібрації на характерних частотах, а також температури в контрольних точках. Алгоритм оцінки технічного стану дозволяє за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності і середньоквадратичного значення віброшвидкості визначити поточний технічний стан об'єкта за допомогою апарату нечіткої логіки.

Ключові слова: діагностика; електрична машина; дефект; технічний стан; вимірювання; електророзрядна активність; вібрація; спектр; нечітка логіка; модель.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.102-116

Вступ. На сучасному етапі розвитку світового суднобудування єдині електроенергетичні системи (ЄЕЕС) з системами електроприводу (СЕП) судна знаходять все більш широке застосування на морському та річковому транспорті.

Класична побудова єдиних електроенергетичних установок (ЄЕЕУ) з рівнем напруги ЄЕЕС і СЕП до 1000 В знаходить широке застосування у вітчизняному та закордонному суднобудуванні. Це дозволяє використовувати пропульсивну установку сумарною потужністю орієнтовно 16 МВт. У міру досягнення верхньої межі потужності, істотно зростають струми збірних шин головних розподільних щитів (ГРЩ), що обумовлює необхідність застосування системи подвійних шин і комутаційних апаратів з високою комутаційною здатністю. У конструктивному плані система подвійних шин характеризується дворазовим збільшенням кількості секцій ГРЩ і погіршенням масогабаритних показників.

Рациональним рішенням стає застосування високовольтних суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з використанням комутаційної апаратури напругою 6,6 кВ або 11 кВ. Шляхом збільшення напруги головних генераторів відбувається суттєве зниження струму на збірних шинах. Це дозволяє відмовитися від системи подвійних шин і виконати компонування головного розподільного пристрою (ГРП) за спрощеною схемою.

Зниження величини струму тягне за собою зменшення перетину збірних шин, а також кабелів. Необхідність введення понижуючих трансформаторів призводить до незначного зниження масогабаритних показників СЕЕС, що компенсується зменшенням ваги ГРП і кабельних трас [1, 2].

Постановка проблеми. Надійність роботи суден з високовольтною СЕЕС значною мірою залежить від стану електроустаткування, що забезпечує безперебійну роботу енергетичних систем, позапланова зупинка яких може призвести до серйозних аварій, що тягне за собою тривалі простої і суттєві фінансові втрати, а, можливо, і людські життя.

Для обслуговування технічного обладнання судна, необхідна велика кількість спеціалістів різного напрямку. У процесі підготовки таких фахівців морські навчальні заклади нашої держави використовують міжнародні конвенції, кодекси, рекомендації ІМО і SOLAS [3, 4]. Міжнародною морською організацією, для кожного напрямку, розроблені свої ІМО курси підготовки [3]. Тому, навчання та стажування майбутніх морських фахівців відбувається згідно цих курсів та міжнародної конвенції з підготовки та дипломування моряків і несення вахти.

Отже, виникає необхідність підвищення експлуатаційної надійності і безперебійності роботи силового електрообладнання. Як правило, таке обладнання є конструктивним об'єднанням високовольтного електроустаткування, механічних або гідравлічних елементів з елементами контролю та інтелектуальною системою управління, що дозволяє здійснювати їх плавний пуск, виведення на заданий режим роботи, необхідне управління параметрами і відключення, що, відповідно до загальноприйнятої класифікації, дозволяє віднести їх до електромеханічних модулів. Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності функціонування таких модулів є управління режимами роботи обладнання по їх фактичному стану. Такий підхід неможливий без засобів, що дозволяють здійснювати комплексну діагностику технічного стану та управління режимами роботи об'єкта. Дане дослідження спрямоване на вирішення задач повного циклу діагностування: отримання даних, обробка результатів, вироблення сигналів керування, переналаштування режимів роботи об'єкта, отримання зворотного зв'язку для корекції уставок системи контролю, оцінки технічного стану та виявлення несправностей. Система функціонального контролю та діагностування дозволить підвищити ресурс, зменшити аварійність, витрати на ремонт, підвищити ефективність застосування високовольтних електричних машин, що підкреслює актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведений аналіз публікацій різних авторів та інтернаціональних стандартів за тематикою дослідження [5–13] показав велику кількість різних методів діагностики електричних машин, які можна об'єднати у чотири основні групи.

Контроль вібраційних параметрів. Методи засновані на виміру вібрацій окремих елементів агрегату, що дозволяє зробити висновок про стан електродвигуна. До недоліків методів вібродіагностики відносяться: 1) необхідність безпосереднього доступу до діагностуючого агрегату, що не завжди можливо; 2) методи пристосовані до діагностики механічних пошкоджень як двигуна, так і пов'язаного з ним механізму, тому електричні пошкодження не завжди можуть бути своєчасно виявлені по зміні вібраційних параметрів, що призводить до помилкового висновку залежно від порогових значень прийнятих у діагностичній моделі.

Контроль магнітних та електромагнітних потоків. Методи, засновані на вимірюванні й аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна та на аналізі вторинних електромагнітних полів машини. Вони, як правило, застосовуються для високовольтних електродвигунів (від 6 кВ і вище). До їх недоліків відносяться: 1) установка датчиків магнітного поля вимагає безпосереднього доступу до об'єкта діагностування і можлива тільки при виготовленні електродвигуна або при його капітальному ремонті; 2) датчики вторинних електромагнітних полів дуже чутливі до дії зовнішніх електромагнітних випромінювань.

Діагностування стану ізоляції. Методи широко застосовуються при діагностиці електрообладнання. Як правило, їх використання можливе тільки при знятій напрузі, що виключає діагностування працюючих машин у реальному часі в нормальному режимі їх роботи. Проте існує метод діагностування стану ізоляції працюючого електрообладнання, який ґрунтується на реєстрації часткових розрядів, але на сьогодні він розроблений лише для високовольтного обладнання. Крім того, діагностування ізоляції не дає інформації про стан інших елементів конструкції електродвигуна.

Аналіз електричних параметрів асинхронних електродвигунів. Найбільш розповсюдженими методами є такі, що ґрунтуються на аналізі таких електричних параметрів працюючого обладнання, як струм, напруга і споживана потужність. В якості діагностичних параметрів використовуються: гармонійні складові спектра струму статора, гармонійні складові спектра споживаної потужності, спектральні складові амплітуди і фази вектора Парку. Недоліками даних методів є необхідність врахування впливу на електричні параметри характеристик мережі живлення, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у приводі тощо. Крім того, у регульованому електроприводі на основі силових напівпровідникових перетворювачів у спектрах струмів виникають частоти, обумовлені комутацією вентилів, що також необхідно враховувати.

Мета та задачі дослідження. Метою є підвищення ефективності функціонування високовольтних електромеханічних пристроїв, вдосконалення засобів діагностування та управління режимами роботи за результатами діагностики технічного стану.

Вирішуються задачі: вибору методів і засобів комплексної функціональної діагностики технічного стану електричних машин із застосуванням апарату нечіткої логіки; моделювання та розроблення алгоритмів діагностування технічного стану; розробки структури системи.

Виклад основного матеріалу. При діагностуванні складних об'єктів, яким є високовольтне електрообладнання, недоцільно застосовувати тестове діагностування, оскільки воно вимагає складної дорогої апаратури, великих витрат часу, має не високу надійність, і створює тривалий простій устаткування. Також тестове діагностування не дає можливість повною мірою оцінити стан об'єкта діагностування, з огляду на те, що перевірка проводиться без робочого навантаження і велика ймовірність не виявлення дефекту. Всіх вищенаведених недоліків позбавлені системи функціонального діагностування, при яких перевірки здійснюються в робочому режимі та не призводять до простою об'єкта. Діагностування ведеться при робочому навантаженні, отже, знижується ймовірність не виявлення дефектів. Тому для здійснення технічного діагностування високовольтного електрообладнання доцільно застосовувати методи та засоби функціонального комплексного діагностування.

У результаті аналізу основних методів діагностування визначена ефективна сукупність діагностичних параметрів, що включає аналіз електророзрядної активності (ЕРА), вібраційний, струмовий і тепловізорний види контролю. Блок-схема діагностики двигунів з повним набором засобів дана на рисунку 1. Система дозволяє визначити та локалізувати електророзрядні явища, теплові процеси, механічні (вібраційні) явища.

Отримана схема містить велику кількість як контактних, так і безконтактних датчиків і осцилографів. Наявність дефекту визначається по діагностичним параметрам, які можуть бути представлені у вигляді деякого числового значення, укладені в структурі та формі сигналу, а також у наявності певних частот у спектрі сигналу. Все це істотно ускладнює процес діагностування і вимагає залучення досвідченого фахівця. Вирішити дану проблему дозволить розробка вбудованої інтелектуальної комплексної системи діагностування технічного стану високовольтного електроустаткування, яка дозволить автоматично визначати поточний стан об'єкта.

Завдання технічного діагностування включає контроль і оцінку поточного стану об'єкта і, у разі виявлення, пошук несправностей. Обрані методи повною мірою допомагають виконати ці завдання, причому вимірювання параметрів електророзрядної активності (ЕРА) і

середньоквадратичного значення (СКЗ) віброшвидкості дозволяють контролювати та оцінювати поточний стан електричних і механічних елементів обладнання, а контроль температури та спектральний аналіз струму і вібрації дозволяють знайти несправності, що виникли.

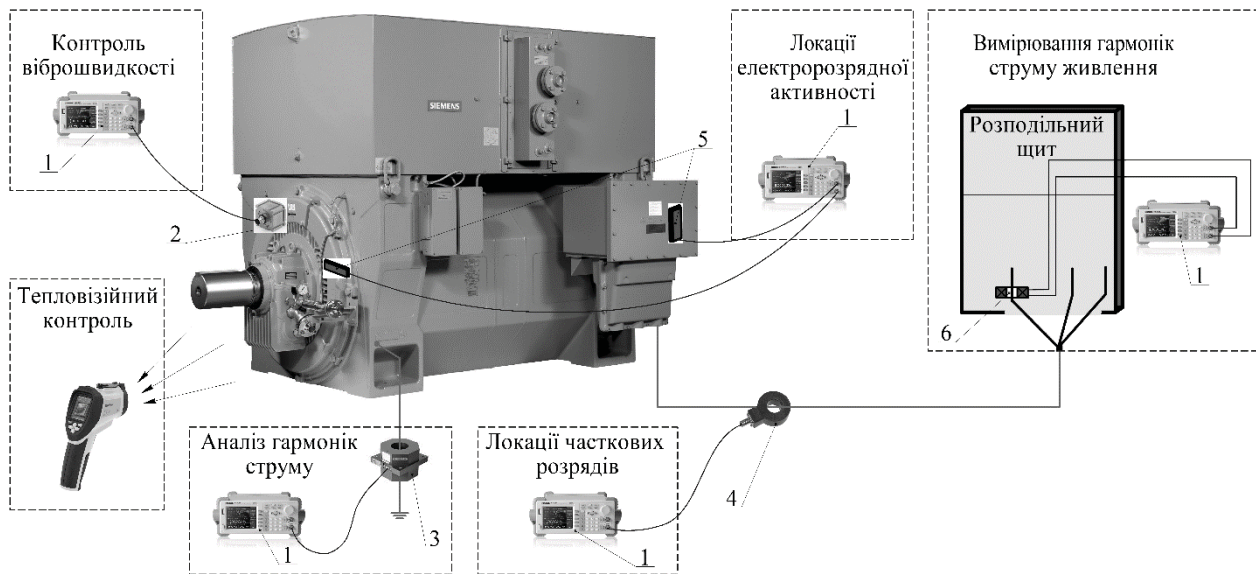


Рисунок 1 – Система багатопараметричної діагностики високовольтних двигунів:

- 1 – осцилограф; 2 – вібродатчик магнітного типу; 3 – вимірювальний трансформатор струму;
4 – датчик локації часткового розряду кабельної лінії, високочастотний трансформатор струму;
5 – датчики контролю електророзрядної активності;
6 – вимірювальний трансформатор струму

Контроль ЕРА і СКЗ віброшвидкості дозволяє здійснити комплексну оцінку поточного стану, віднісши його до одного з п'яти класів: «Норма», «Норма з відхиленнями (НЗВ)», «Норма зі значними відхиленнями (НЗЗВ)», «Погіршення», «Граничне». При виявленні перших двох станів, об'єкт повністю працездатний і його можна експлуатувати в штатному режимі. Якщо стан об'єкта «НЗЗВ» або «Погіршення», то необхідний контроль додаткових параметрів, пошук несправностей і вибір полегшеного режиму експлуатації. У разі граничного стану виконується пошук несправностей і відключення об'єкта. Таким чином, процес діагностування технічного стану суднових високовольтних електричних машин включає класифікацію технічного стану та пошук несправностей.

Структурна схема системи технічного діагностування має вид, представлена на рис. 2.



Рисунок 2 – Структурна схема системи технічного діагностування

Модель діагностування технічного стану є комплексною і включає рішення задач класифікації технічного стану і пошуку несправностей. Розробка пов'язана з великим обсягом даних, що важко формалізуються, тому доцільно застосування апарату нечіткої логіки. Аналіз методів діагностування високовольтних електричних машин показав, що, для вирішення задачі класифікації технічного стану, найбільш застосовні методи електророзрядної активності та вібродіагностика, що проводяться при робочій напрузі електродвигуна. Метод електророзрядної активності (ЕРА) дозволяє виявити електричні

дефекти в наступних вузлах: у колах живлення електродвигуна; обмотці статора; пакетах активної частини; колах живлення ротора; щітково-контактному апараті; контактних з'єднань у клемній коробці [14]. Вібродіагностика – дефекти механічного характеру електродвигуна [15]. Спільне застосування двох цих методів дозволить здійснити комплексну оцінку технічного стану двигуна і віднести його до одного з класів станів.

Проведення діагностики високовольтних електричних машин на робочій напрузі пов'язане з труднощами які виникають від великої різноманітності конструктивних виконань, фірм виробників і способів підключення до мережі. Це тягне за собою необхідність використовувати різні варіанти знімання сигналів і типи датчиків, стосовно кожного конкретного випадку. Різні підходи до кожного модулю відповідно ускладнюють аналіз їх технічного стану, тому що не працює один з основних методів аналізу – порівняння з однотипним обладнанням. Це ускладнює накопичення даних, не дозволяє узагальнювати результати, отримувати граничні критерії.

Величина ЕРА в ізоляції модуля так само залежить від режиму робіт, найбільша активність в ізоляції статора буває при його пуску, оскільки в цьому випадку обмотка піддається найбільшим електродинамічним впливам. З огляду на велику гаму застосовуваних модулів (заводів виробників, тип ізоляції і т.д.) неможливо дати конкретні критичні величини ЕРА.

У таблиці 1 визначено якісний підхід до оцінки технічного стану електричної машини. Видно, що всі несправності проходять однакові стадії розвитку: поява ознак, стійка фіксація, динамічний розвиток, граничний стан, отже, ця інформація має бути використана при формалізації нечіткої моделі класифікації за параметрами ЕРА.

Найбільш зручний спосіб ідентифікації технічного стану механічних частин високовольтної електричної машини – середньоквадратичне значення віброшвидкості [16]. Згідно з цим параметром, стани модулів поділені на чотири зони.

Зона А. У цю зону потрапляють, як правило, нові машини, які щойно введені в експлуатацію.

Зона В. Машини, які потрапляють до цієї зони, зазвичай вважають придатними для подальшої експлуатації без обмеження термінів.

Зона С. Машини, що потрапляють до цієї зони, зазвичай розглядають як непридатні для тривалої безперервної експлуатації. Зазвичай дані машини можуть функціонувати обмежений період часу, доки з'явиться потрібна можливість проведення ремонтних робіт.

Зона D. Рівні вібрації в цій зоні зазвичай розглядають як досить серйозні, щоб спричинити пошкодження машини.

Таблиця 1 – Класифікація технічного стану суднових електричних машин

Технічний стан		Норма (Н)	Норма з відхиленнями (НЗВ)	Норма зі значними відхиленнями (НЗЗВ)	Погіршення (П)
Види дефектів	Коронна активність в обмотці статора	Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку	Перехід у граничний стан
	Часткові розряди в корпусній ізоляції, розряди в кабельній лінії	Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку	Перехід у граничний стан
	Іскріння в контактах у районі клемної коробки	Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку	Перехід у граничний стан
	Пазовий розряд в обмотці статора		Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку
	Розряди в обмотці ротора		Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку
	Іскрові розряди в активній сталі			Поява ознак явища	Явище фіксується стійко

Вібрація конкретної машини залежить від її розмірів, динамічних характеристик віброуючих деталей, способу монтажу і призначення. При виборі зон допустимої вібрації машини необхідно враховувати також умови, що впливають на її вібраційний стан.

Незалежно від типу підшипників середньоквадратичне значення віброшвидкості статорних елементів (наприклад, опор підшипників) машин більшості типів, як правило, адекватно характеризує умови роботи роторів, їх вплив на опорні елементи і сусідні механізми, а також стан самих машин у широкому діапазоні робочих швидкостей.

Згідно ДСТУ ISO 10816-1:2007 всі електричні машини поділяються на наведені нижче чотири класи [16].

Клас 1 – Окремі частини двигунів і машин, з'єднані з агрегатом і працюють у звичайному для них режимі (серійні електричні мотори потужністю до 15 кВт є типовими машинами цієї категорії).

Клас 2 – Машини середньої величини (типові електромотори потужністю від 15 до 875 кВт) без спеціальних фундаментів, жорстко встановлені двигуни або машини (до 300 кВт) на спеціальних фундаментах.

Клас 3 – Потужні первинні двигуни та інші потужні машини з обертовими масами, встановлені на масивних фундаментах, щодо жорстких у напрямку вимірювання вібрації.

Клас 4 – Потужні первинні двигуни та інші потужні машини з обертовими масами, встановлені на фундаменти, щодо податливості в напрямку вимірювання вібрації (наприклад, турбогенератори і газові турбіни з вихідною потужністю понад 10 МВт).

Зразкові межі зон СКЗ віброшвидкості машин різних класів наведені в таблиці 2 [16].

Таблиця 2 – Приблизні межі зон для машин різних класів [16]

$v_{rms}, \text{мм/с}$	Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Дані таблиць 1 і 2 є вихідними даними для формалізації нечіткої моделі класифікації технічного стану високовольтних електричних машин [17, 18].

Завданням діагностики є визначення технічного стану об'єкта по спостережуваним проявам дефектів, отже, вхідними даними моделі є види дефектів, а виходами – шуканий стан об'єкта.

Згідно з таблицею 1, за результатами вимірювання параметра ЕРА можна виявити шість несправностей: Y_1 – «Коронна активність в обмотці статора»; Y_2 – «Часткові розряди в корпусній ізоляції розряди в кабельної лінії»; Y_3 – «Іскріння в контактах у районі клемної коробки»; Y_4 – «Пазовий розряд в обмотці статора»; Y_5 – «Розряди в обмотці ротора»; Y_6 – «Іскрові розряди в активній сталі». Розвиток кожного дефекту двигуна проходить наступні стадії: поява ознак явища; явище фіксується стійко; є динаміка розвитку; перехід у граничний стан, отже, в якості перших шести входів нечіткої моделі класифікації технічного стану, задаються несправності, які виявляються по ЕРА з чотирма функціями належності, котрі характеризують стадії розвитку дефекту (рисунки 3).

Перші дві стадії розвитку дефекту дозволяють подальшу експлуатацію об'єкта без обмежень, дві інші вимагають пильної уваги і, можливо, зупинки для ремонту, отже, як інтервалу визначення функції приналежності входів, приймаємо $[-1; 1]$. Функції приналежності «Поява» і «Фіксація» задаються на інтервалі $[-1; 0]$, який показує, що об'єкт не потребує негайної зупинки. Функції приналежності «Динаміка» і «Границя» задаються на інтервалі $[0; 1]$, що показує необхідність зупинки об'єкта.

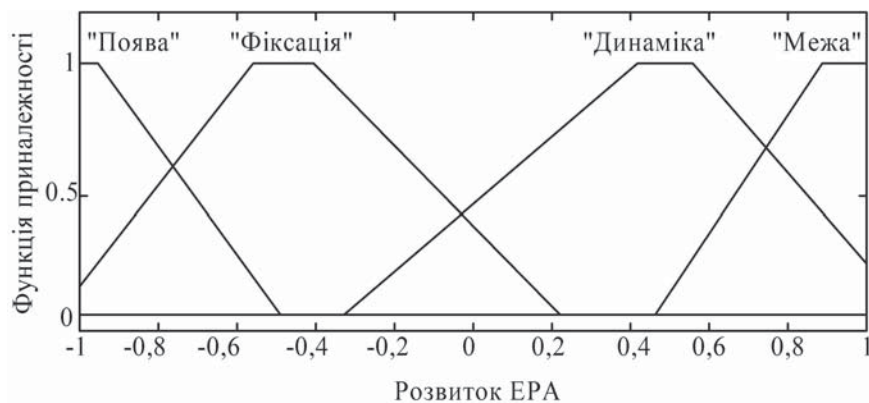


Рисунок 3 – Входи нечіткої моделі класифікації по параметру електророзрядної активності

Згідно з таблицею 2 машина, що належить одному з чотирьох класів може перебувати в зоні А, В, С або D (1). Приклад входу нечіткої моделі класифікації для модуля третього класу представлений на рисунку 4.

$$\begin{aligned} A &= (0, 2.8)_0 \cup (0.28, 1.8)_1; \\ B &= (1.8, 4.5)_0 \cup (2.8, 4.5)_1; \\ C &= (4.5, 18)_0 \cup (7.1, 11.2)_1; \\ D &= (11.2, 45)_0 \cup (18, 45)_1. \end{aligned} \quad (1)$$

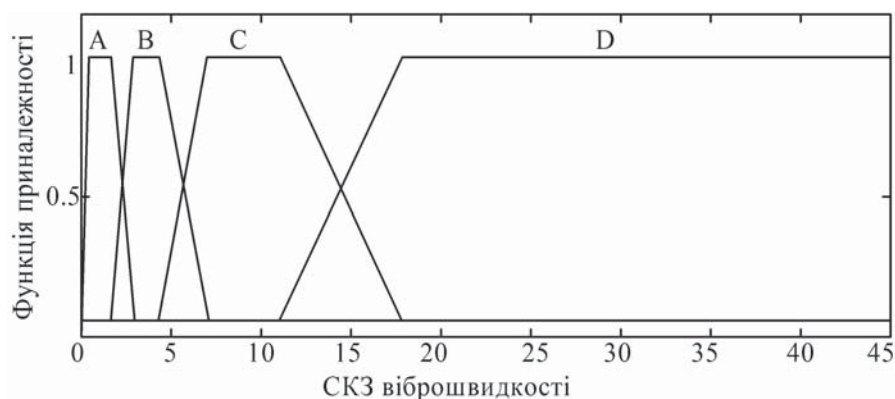


Рисунок 4 – Вхід нечіткої моделі класифікації по СКЗ віброшвидкості

Таким чином, на вхід нечіткої логічної системи подається множина несправностей об'єкта $\tilde{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7\}$, де Y_1 – «Коронна активність в обмотці статора»; Y_2 – «Часткові розряди в корпусній ізоляції розряди в кабельної лінії»; Y_3 – «Іскріння в контактах у районі клемної коробки»; Y_4 – «Пазовий розряд в обмотці статора»; Y_5 – «Іскрові розряди в активній сталі»; Y_6 – «Розряди в обмотці ротора»; Y_7 – «СКЗ віброшвидкості електродвигуна».

Дефекти електродвигуна мають таку класифікацію: «Норма» – відсутність явного дефекту; «Норма з відхиленнями (НЗВ)» – малозначний дефект; «Норма зі значними відхиленнями (НЗЗВ)» – значний дефект; «Погіршення» – критичний дефект; «Передаварійний» – граничний стан. Для завдання виходу X – «Стан» нечіткої моделі класифікації задаються зазначені п'ять видів стану дефектів.

Підсумковий діагноз за результатами комплексного обстеження визначається відповідно до наступного: якщо ряд застосовуваних методів показує наявність початкової стадії розвитку дефекту (оцінка «НЗВ»), то підсумкова оцінка технічного стану встановлюється за шкалою оцінок на щабель вище (оцінка «НЗЗВ») і т.д. Якщо всі використовувані методи дають оцінку «НЗЗВ», то підсумкова оцінка стану «Погіршення».

Виходячи з цих вимог, нечітка база знань матиме такий вигляд:

R1: якщо $Y_1 \in \text{«Поява»}$ і $Y_2 \in \text{«Поява»}$... і $Y_6 \in \text{«Поява»}$ і $Y_7 \in \text{«А»}$ то $X \in \text{«НЗВ»}$;

R2: якщо $Y_1 \in \text{«Фіксація»}$ і $Y_2 \in \text{«Фіксація»}$... і $Y_6 \in \text{«Фіксація»}$ і $Y_7 \in \text{«В»}$ то $X \in \text{«НЗВ»}$;

R3: якщо $Y_1 \in \text{«Динаміка»}$ і $Y_2 \in \text{«Динаміка»}$... і $Y_6 \in \text{«Динаміка»}$ і $Y_7 \in \text{«С»}$ то $X \in \text{«Погіршення»}$;

R4: якщо $Y_1 \in \text{«Межа»}$ або $Y_2 \in \text{«Межа»}$... або $Y_6 \in \text{«Межа»}$ і $Y_7 \in \text{«С»}$ то $X \in \text{«Передаварійне»}$;

R5: якщо $Y_1 \in \text{«Поява»}$ або $Y_2 \in \text{«Поява»}$... або $Y_6 \in \text{«Поява»}$ і $Y_7 \in \text{«А»}$ то $X \in \text{«Норма»}$;

R6: якщо $Y_1 \in \text{«Фіксація»}$ або $Y_2 \in \text{«Фіксація»}$... або $Y_6 \in \text{«Фіксація»}$, і $Y_7 \in \text{«В»}$ то $X \in \text{«Норма з відхиленнями»}$;

R7: якщо $Y_1 \in \text{«Динаміка»}$ або $Y_2 \in \text{«Динаміка»}$... або $Y_6 \in \text{«Динаміка»}$, і $Y_7 \in \text{«С»}$ то $X \in \text{«Норма зі значними відхиленнями»}$;

R8: якщо $Y_1 \in \text{«Межа»}$ або $Y_2 \in \text{«Межа»}$... або $Y_6 \in \text{«Межа»}$ і $Y_7 \in \text{«С»}$ то $X \in \text{«Погіршення»}$.

Для перетворення чітких вхідних значень у чіткі вихідні використовується п – вхідний алгоритм нечіткого логічного виведення Mamdani [18].

Процедура отримання логічного виведення наступна:

1. Передбачається, що вхідні змінні прийняли деякі конкретні (чіткі) значення $Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, Y_{40}, Y_{50}, Y_{60}, Y_{70}$, за якими знаходяться ступені істинності $y_j(Y_{i0}), i \in [1, 7]$ для передумов кожного з наведених правил і рівні «відсікання» $\alpha_l, l \in [1; k]$ функцій приналежності для передумов кожного з правил із використанням операцій мінімум (2):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= y_1(Y_{10}) \wedge y_1(Y_{20}) \wedge y_1(Y_{30}) \wedge y_1(Y_{40}) \wedge y_1(Y_{50}) \wedge y_1(Y_{60}) \wedge y_1(Y_{70}); \\ \alpha_k &= y_k(Y_{10}) \wedge y_k(Y_{20}) \wedge y_k(Y_{30}) \wedge y_k(Y_{40}) \wedge y_k(Y_{50}) \wedge y_k(Y_{60}) \wedge y_k(Y_{70}). \end{aligned} \quad (2)$$

Потім знаходимо (3) «усічені» функції приналежності $x'_l(\tilde{X})$:

$$\begin{aligned} x'_1(\tilde{X}) &= \alpha_1 \wedge x_1(\tilde{X}); \\ x'_n(\tilde{X}) &= \alpha_n \wedge x_n(\tilde{X}). \end{aligned} \quad (3)$$

2. Проводиться об'єднання функцій, усічених на попередньому етапі логічного виводу з використанням операції $\max$ (« $\vee$ »), у результаті чого виходить комбінована нечітка підмножина (4), що описується функцією приналежності $\mu_{\Sigma}(\tilde{X})$ і відповідне логічному виводу для вихідної змінної А:

$$\mu_{\Sigma}(\tilde{X}) = x(\tilde{X}) = x'_1(\tilde{X}) \vee x'_2(\tilde{X}) \vee \dots \vee x'_n(\tilde{X}). \quad (4)$$

3. Знаходження (5) чіткого значення вихідної змінної визначається як центр ваги функції приналежності $\mu_{\Sigma}(\tilde{X})$:

$$x = \frac{\int_G \tilde{X} \cdot \mu_{\Sigma}(\tilde{X}) d\tilde{X}}{\int_G \mu_{\Sigma}(\tilde{X}) d\tilde{X}}. \quad (5)$$

У результаті комп'ютерного моделювання отриманої нечіткої моделі діагностування отримано поверхні відгуку і графіки залежностей стану об'єкта від рівня розвитку несправностей. Для дослідження двигуна із застосуванням даної моделі, необхідно на вхід подати відносні значення розвитку дефектів, що виявляються по ЕРА і абсолютне значення СКЗ віброшвидкості. Рівню розвитку «Поява» відповідає значення входу «-1», «Фіксація» – «-0.5», «Поява» – «0.5», «Межа» – «1». На виході буде отриманий номер класу технічного стану від 1 до 5. При отриманні дробового значення стану, необхідно провести округлення, згідно з правилами математики.

У разі класифікації поточного стану як «Норма зі значними відхиленнями» (НЗЗВ) виникає необхідність більш ретельного технічного контролю і залучення додаткових методів

діагностування, що дозволяють знайти несправності, що виникли. До таких методів належать: методи спектрального аналізу вібрації [19], споживаного струму двигуна та тепловізорний контроль. Отже, актуальна розробка математичної моделі пошуку несправностей суднових високовольтних електричних машин на основі спільного використання цих методів. Входами моделі є характерні частоти спектрів струму і вібрації, абсолютні і відносні показники температури, виходами – характерні несправності електричної машини.

Спектральний аналіз частотних характеристик струму живлення і вібрації виконується наступним чином. Протягом заданого інтервалу часу роблять запис сигналу значень струмів, які споживаються модулем і вібрації, за допомогою швидких перетворень Фур'є, здійснюють перетворення сигналу в частотний спектр і виділяють частоти, інформативні для пошуку несправностей. Отримані амплітуди характерних частот порівнюють з еталонними, отриманими при дослідженні нового, справного, двигуна в аналогічних умовах. Таким чином, для пошуку несправностей електричної машини за параметрами струму і вібрації необхідно знати перелік несправностей і характерні діагностичні частоти.

Для формалізації нечіткої моделі пошуку несправностей задається вхідний вектор $\tilde{A} = \{A_i\}$, $i \in [1, n]$ – множина діагностичних параметрів.

Оцінка стану двигуна по амплітудним параметрам здійснюється порівнянням з аналогічними еталонними характеристиками, отже, необхідно провести нормування вхідних параметрів моделей. Відхилення поточних значень параметрів обчислюється за (6):

$$A_i = \frac{a_i - a_{0i}}{a_{0i}}, \quad (6)$$

де a_i – поточне значення амплітуди, a_{0i} – відповідний параметр еталонного модуля.

Якщо поточні та еталонні значення збігаються, то $A_i = 0$. Якщо $a_i < a_{0i}$, то $A_i < 0$, отже, відхилення відсутнє і на вхід моделі подається $A_i = 0$. У випадку $a_i > a_{0i}$ значення A_i покаже перевищення поточного значення параметра щодо еталона. Для параметрів амплітуди спектра струму і вібрації дане значення не повинно перевищувати $\sqrt{2}$. Перевищення даного порогу, свідчить про відмову об'єкта.

Вимірювання параметрів вібрації здійснюється в трьох взаємно перпендикулярних напрямках, тому кожна характерна частота, вимірювана в цих напрямках повинна мати окремий вхід. Частоти струму також мають самостійні входи.

Тепловізорний контроль стану електричної машини здійснюється як за результатами абсолютного значення температури в контрольних точках, так і за абсолютним відхиленням параметра. Знімаються термограми статора двигуна з лівого і правого боку, а також із боку виходу повітрообдуву. При справному стані об'єкта картина розподілу ділянок із підвищеною температурою симетрична і регулярна. Локальний перегрів корпусу, свідчить про наявність несправностей.

Абсолютне відхилення температури визначається за формулою (7):

$$\Delta t = a_i - a_{0i}, \quad (7)$$

де a_i – поточне значення амплітуди, a_{0i} – відповідний параметр еталонного модуля.

Електрична машина має m несправностей, які виявляються виміром n діагностичних параметрів, $n-5$ з яких виявляються виміром амплітуд струму і вібрації, чотири – абсолютним відхиленням температури в контрольних точках (температура корпусу з боку підшипників; температури води і повітря теплообмінника; щітково-колекторного апарату; статора; клемної коробки), і один – за абсолютними значеннями температури корпусу з боку підшипників.

В якості вхідних параметрів амплітуд спектрів струму і вібрації системи нечіткої логіки використовується множина: $T_i = \{\text{«Добре»}, \text{«Припустимо»}, \text{«Погано»}\}$. При цьому кожен із термів буде оцінюватися від 0 до 2.

Вхідні параметри абсолютного значення температури корпусу оцінюються в межах від 0 до 110°C, використовуючи терми {«Добре», «80», «100»}, що характеризують температури прояви несправностей підшипників.

За результатами вимірювань основних визначальних параметрів може виявитися справний, працездатний або непрацездатний стан об'єкта. Перші два стани дозволяють подальшу експлуатацію об'єкта, останній вимагає його зупинки, тому, на вихідній множині $\tilde{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ несправностей модуля на інтервалі $[-1, 1]$ задаються значення функції приналежності таким чином, що при $F(A_i) \in [0, 1]$ об'єкт допускається до експлуатації, $F(A_i) \in [-1, 0]$ об'єкт не допускається до експлуатації. Взаємозв'язок між введеними множинами описується наступними нечіткими правилами.

Загальний вигляд таких правил має наступний вигляд:

R1: якщо $A_1 \in \text{«Добре»}$ і ... $A_n \in \text{«Добре»}$, то $B_j = f_1$;

R2: якщо $A_1 \in \text{«Припустимо»}$ і ... $A_n \in \text{«Припустимо»}$, то $B_j = f_1$;

R3: якщо $A_1 \in \text{«Погано»}$ і ... $A_n \in \text{«Погано»}$, то $B_j = f_2$,

де $A_i, i \in [1, n]$ – діагностичні параметри; $B_j, j \in [1, m]$ – несправності об'єкта діагностування; f_1 – висновок «об'єкт допускається до експлуатації»; f_2 – висновок «об'єкт не допускається до експлуатації».

Для перетворення чітких вхідних значень у чіткі вихідні використовується n -вхідний алгоритм нечіткого логічного висновку Takagi-Sugeno, який має наступний вигляд [18]:

1. Передбачається, що вхідні змінні прийняли деякі конкретні (чіткі) значення $A_1^0 \dots A_n^0$ і знаходяться рівні «відсікання» для передумов кожного з правил (8):

$$\alpha_j = \max[B(A_j^0)], \quad j \in [1, m]. \quad (8)$$

2. Для кожного правила обчислюються індивідуальні виходи (9):

$$B_j^* = f_1, \quad B_j^* = f_2. \quad (9)$$

3. Для кожного виходу моделі обчислюється агрегатний вихід нечіткої логічної системи (10):

$$b_j^* = \frac{\alpha_1 \cdot B_1^* + \dots + \alpha_m \cdot B_m^*}{\alpha_1 + \dots + \alpha_m}. \quad (10)$$

Розроблена модель дозволяє за результатами аналізу спектрів струму живлення і вібрації електричної машини, а також температурі корпусу знайти несправності об'єкта й оцінити ступінь їх розвитку. Структура визначення технічного стану високовольтної електричної машини на основі описаного методу діагностування наведена на рисунку 5.

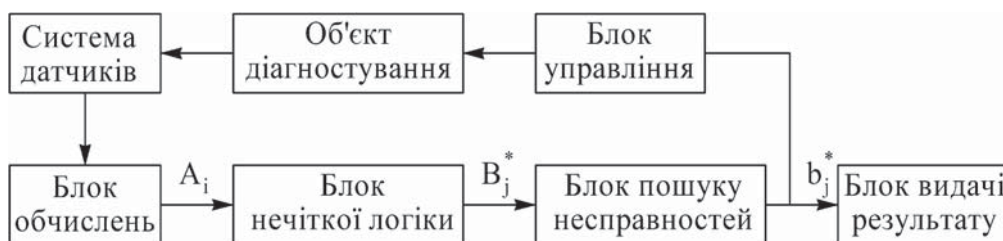


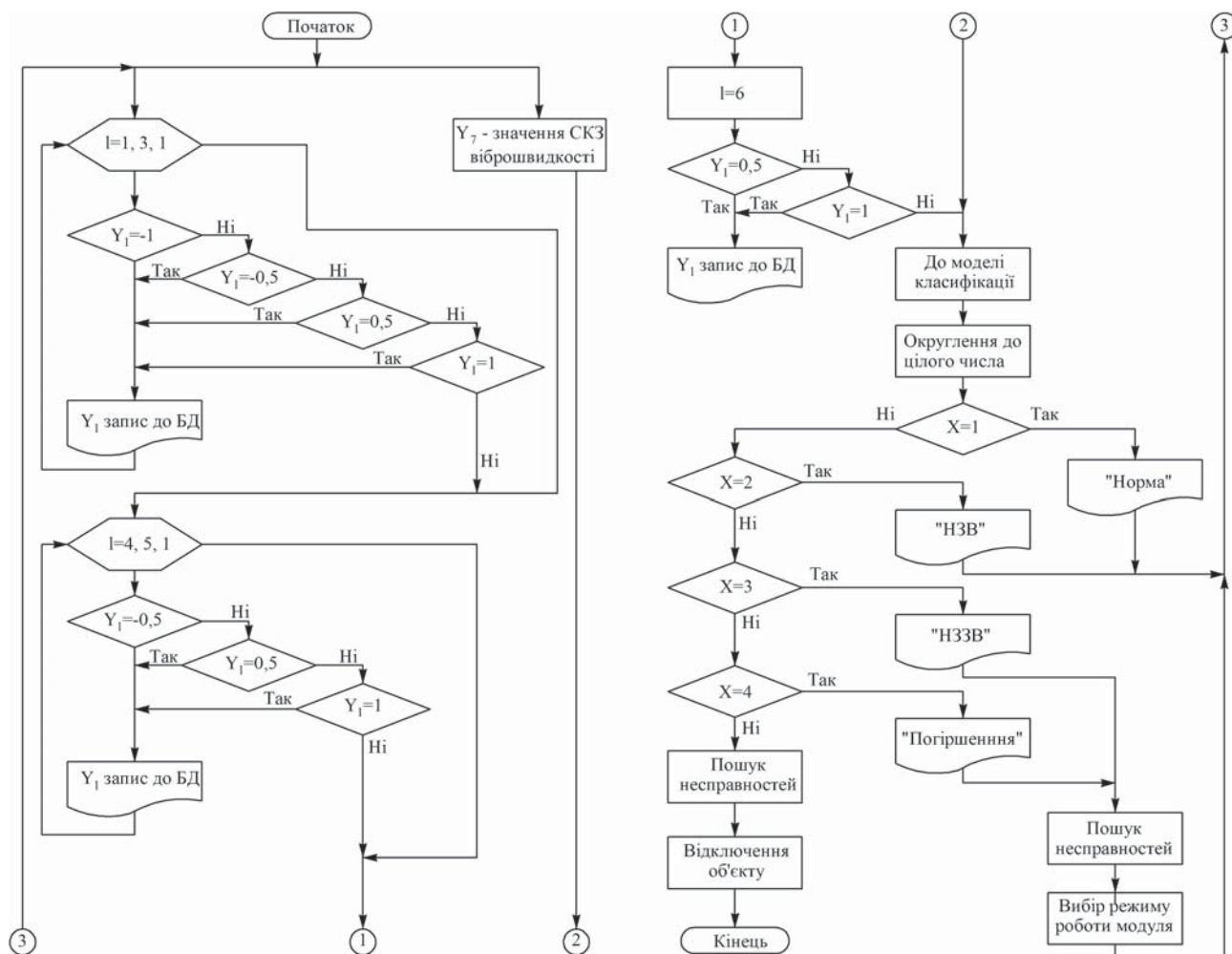
Рисунок 5 – Структурна схема реалізації нечіткого методу пошуку несправностей високовольтних електричних машин

З об'єкта діагностування за допомогою системи датчиків знімаються поточні значення параметрів діагностування, які передаються у блок обчислень та перераховуються у відносні одиниці ($A_i, i \in [1, n]$). Ці значення передаються у блок нечіткої логіки, де відбувається визначення коефіцієнтів розвитку несправностей $B_j^*, j \in [1, m]$. Отримані коефіцієнти подаються на вхід блоку пошуку несправностей, де вибираються значення. Виявлені несправності подаються на блок видачі результату. У блок управління подається сигнал на

відключення модуля. Якщо коефіцієнти розвитку всіх несправностей більше або дорівнюють нулю, то результатом є повідомлення про працездатність об'єкта.

Алгоритм оцінки технічного стану. Першочерговим завданням технічної діагностики є контроль параметрів, що дозволяє визначити поточний стан об'єкта і віднести його до одного з заздалегідь визначених класів: «Норма», «Норма з відхиленнями», «Норма зі значними відхиленнями», «Погіршення» або «Передаварійне». Для цього необхідно скласти алгоритм оцінки технічного стану, на основі раніше розробленої моделі класифікації технічного стану. Схема даного алгоритму приведена на рисунку 6.

В якості діагностичних параметрів для оцінки технічного стану обрано параметри ЕРА і СКЗ віброшвидкості. Розроблена математична модель має сім входів ($Y_l, l \in [1,7]$), перші шість ($Y_1 \dots Y_6$), які призначені для несправностей, виявлених за ЕРА, сьомий (Y_7) – для СКЗ віброшвидкості. Параметр ЕРА проходить наступні стадії розвитку: «Поява ознак явища», «Явище фіксується стійко», «Є динаміка розвитку», «Перехід у граничний стан». У процесі моделювання, кожної з цих стадій були присвоєні значення з інтервалу $[-1; 1]$: «Поява ознак явища» – «-1», «Явище фіксується стійко» – «-0,5», «Є динаміка розвитку» – «0,5», «Перехід у граничний стан» – «1».



параметрів $n-5$ з яких амплітуди струму і вібрації на характерних частотах, чотири – відхилення температури й один – за абсолютним значенням температури корпусу. Оцінка стану за параметрами амплітуди на характерних частотах визначається за відносним відхиленням поточного спектра від еталонного. Чотири входи моделі використовують абсолютне відхилення параметрів температури.

Алгоритм функціонує наступним чином. Здійснюється вимір спектрів струму живлення і вібрації в трьох взаємно перпендикулярних напрямках, виділяються амплітуди на характерних частотах. З бази даних (БД) вибираються амплітудні значення струму і вібрації на відповідних частотах і знаходяться відносні відхилення параметрів, які заносяться в БД. Далі здійснюється вимір температури корпусу в районі підшипників, яка також заноситься в БД. Далі вимірюються значення температури в чотирьох контрольних точках. З БД вибираються відповідні значення температури еталонного об'єкта і розраховуються абсолютні відхилення. Отримані дані підставляються в модель пошуку несправностей, виходом якої є m несправностей об'єкта. Проводиться оцінка отриманих коефіцієнтів розвитку несправностей і вибір тих несправностей, коефіцієнти якого негативні. Результатом роботи алгоритму є перелік несправностей, що виникли.

Основні результати та їх обговорення. Запропонована система комплексного функціонального діагностування високовольтних електричних машин дозволить виявляти несправності та визначати дефекти в процесі експлуатації. Метод класифікації технічного стану та алгоритм пошуку несправностей суднових високовольтних електричних машин побудовані із застосуванням нечіткої логіки. Такий підхід дозволяє визначити поточний технічний стан об'єкта та відключити його в разі передаварійного стану. Подальший аналіз результатів теплового контролю, спектрального аналізу струму живлення і вібрації визначити причини відмови. Результати проведеного дослідження показали можливість усунення недоліків методів діагностики електричних машин, що наведені в частині «Аналіз останніх досліджень та публікацій». Обрана сукупність діагностичних параметрів дозволяє компенсувати недоліки одних методів перевагами інших. Дослідження потребує продовження з метою уточнення моделей, забезпечення працездатності на реальних параметрах працюючих високовольтних електричних машин.

Висновки. Проведений аналіз досліджень та публікацій показав велику кількість різних методів діагностики електричних машин.

Для здійснення технічного діагностування високовольтного електрообладнання доцільно застосовувати методи та засоби функціонального комплексного діагностування при яких перевірка здійснюється в робочому режимі і не призводять до простою об'єкта.

Визначена ефективна сукупність діагностичних параметрів, що включає аналіз електророзрядної активності (ЕРА), вібраційний, струмовий і тепловізорний види контролю.

Отримано нечітку модель і метод класифікації технічного стану високовольтних електричних машин, що дозволяють, за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності та СКЗ віброшвидкості визначити технічний стан об'єкта, віднісши його до одного з п'яти класів станів.

Розроблена модель пошуку несправностей, реалізована за допомогою апарату нечіткої логіки, що дозволяє по виміряним значенням амплітуд струму і вібрації на характерних частотах, а також температури в контрольних точках, виявити несправності об'єкта.

Розроблено алгоритм оцінки технічного стану, що дозволяє за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності і СКЗ віброшвидкості, за допомогою апарату нечіткої логіки, визначити поточний технічний стан об'єкта та, у разі передаварійного стану, відключити об'єкт.

Запропоновано алгоритм пошуку несправностей суднових високовольтних електричних машин, що дозволяє за результатами тепловізорного контролю і спектрального аналізу струму живлення і вібрації за допомогою нечіткої логічної моделі, визначити причини відмови об'єкта.

Перспективи подальших досліджень. У найближчій перспективі є необхідність перевірки адекватності моделей функціонування запропонованих алгоритмів реальним статистичним даним, що знято з конкретного працюючого обладнання на судні та відповідного корегування моделі пошуку несправностей. Подальші дослідження доцільно спрямувати для використання запропонованих методів і засобів діагностування, розроблених моделей та алгоритмів для побудови єдиного комплексу функціонального діагностування всіх потужних високовольтних машин у робочому режимі на судні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Будашко В. В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія / В. В. Будашко, О. М. Піпченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко. Одеса: НУ «ОМА», 2020. 398 с.
2. Іванов А. А., Тимофеев К. В., Авраменко М. М., Растьогіна Г. І. Тренажер високовольтного обладнання для підготовки суднових фахівців. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2019. № 1 (20). С. 20–29.
3. Electro-technical officer. Model course 7.08, International Maritime Organization, London. 2014. 181 p.
4. SOLAS. Consolidated Edition. London: International Maritime Organization, 2020. 588 p.
5. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. Кременчук. 2019. 122 с.
6. Ma F., Qi L., Ye S., Chen Y., Xiao H., Li S. Research on fault diagnosis algorithm of ship electric propulsion motor. Appl. Sci. 2023, 13, 4064.
7. Електропривод і автоматизація: Навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Ю. М. Хандола, І. П. Ільчов, В. Ю. Рамш, В. Я. Бунько; За ред. О. Ю. Синявського. 2-е вид., доп і перероб., Київ, 2015. 604 с.
8. Gegenava A., Khazanov A. Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. "Three Steps Test" TST. In Proceedings of the 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Quebec City, QC, Canada, 18–21 June 2023; pp. 1–4.
9. Jiang B.; Huang X.; Liu Y.; Nategh, S. Accelerated destructive experiment design of motor stator winding insulation systems. In Proceedings of the 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy, 8–9 April 2021; pp. 225–230.
10. IEC 60034-18-31-2012; Rotating Electrical Machines Part 18–31: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Thermal Evaluation and Classification of Insulation Systems Used in Rotating Machines. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 15.
11. IEC 60034-18-32-2022; Rotating Electrical Machines Part 18–32: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation by Electrical Endurance. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022; p. 15.
12. IEC 60034-18-33-2010; Rotating Electrical Machines Part 18–33: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Multifactor Evaluation by Endurance Under Simultaneous Thermal and Electrical Stresses. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2010; p. 11.
13. IEC 60034-18-34-2012; Rotating Electrical Machines Part 18–34: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation of Thermomechanical Endurance of Insulation Systems. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 12.
14. Seri P., Ghosh R., Montanari G. C. An unsupervised approach to partial discharge monitoring in rotating machines: Detection to diagnosis with reduced need of expert support. IEEE Trans. Energy Convers. 2021, 36, 2485–2492.

15. Xu X., Yan X., Yang K., Zhao J. Ю., Sheng C., Yuan C. Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transp. Saf. Environ.* 2021, 3, 85–102.
16. ДСТУ ISO 10816-1:2007. Вібрація. Контроль стану машин за наслідками вимірювань вібрації на частинах, що не обертаються. Частина 1. Загальні вимоги.
17. Han J., Li X. D., Yu D. Yet al. Application of rough set based fuzzy neural network in fault diagnosis. *J Hefei Univ Technol Nat Sci.* 2012; 35:577–80.
18. Balasubramaniam P. and Ramesh Babu N. *Fuzzy Logic Controllers and Applications.* eBook (PDF) ISBN 978-0-85014-875-6. 2025 p.126.
19. Sano T. Diagnostic Frequency Response Analysis (FRA) Techniques for Faults in Transformers. *MEIDEN REVIEW*, vol. 7, no. 1, pp. 28–33, 2015.

REFERENCES

1. Budashko, V. V. (2020). *Vysokovoltnei tekhnolohii v morskii elektroinzhenerii: monografiia* / V. V. Budashko, O. M. Pipchenko, V. V. Ponomarenko, V. A. Shevchenko. Odesa: NU «OMA», 398 s.
2. Ivanov, A. A., Tymofeiev, K. V., Avramenko, M. M., Rastohina, H. I. (2019). *Trenazher vysokovoltного obladnannia dlia pidhotovky sudnovykh fakhivtsiv.* Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii. 2019. № 1 (20). S. 20–29.
3. *Electro-technical officer.* (2014). *Model course 7.08,* International Maritime Organization, London. 181 p.
4. *SOLAS* (2020). *Consolidated Edition.* London: International Maritime Organization, 588 p.
5. Chorny, O. P., Zachepa, Yu. V., Tytiuk, V. K., Chorna, O. A. (2019). *Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh obiektiv : navchalnyi posibnyk.* Kremenichuh. 122 s.
6. Ma, F., Qi, L., Ye, S., Chen, Y., Xiao, H., Li, S. (2023). Research on fault diagnosis algorithm of ship electric propulsion motor. *Appl. Sci.* 13, 4064.
7. *Elektropryvod i avtomatyzatsiia* (2015). *Navchalnyi posibnyk* / O. Iu. Syniavskiy, P. I. Savchenko, V. V. Savchenko, Yu. M. Lavrinenko, V. V. Kozyrskiy, Yu. M. Khandola, I. P. Ilichov, V. Iu. Ramsh, V. Ia. Bunko; Za red. O. Iu. Syniavskoho. 2-e vyd., dop i pererob., Kyiv. 604 s.
8. Gegenava, A., Khazanov, A. (2023). Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. “Three Steps Test” TST. In *Proceedings of the 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Quebec City, QC, Canada*, pp. 1–4.
9. Jiang, B., Huang, X., Liu, Y., Nategh, S. (2021). Accelerated destructive experiment design of motor stator winding insulation systems. In *Proceedings of the 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy*, pp. 225–230.
10. IEC 60034-18-31-2012; *Rotating Electrical Machines Part 18–31: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Thermal Evaluation and Classification of Insulation Systems Used in Rotating Machines.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 15.
11. IEC 60034-18-32-2022; *Rotating Electrical Machines Part 18–32: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation by Electrical Endurance.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022; p. 15.
12. IEC 60034-18-33-2010; *Rotating Electrical Machines Part 18–33: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Multifactor Evaluation by Endurance Under Simultaneous Thermal and Electrical Stresses.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2010; p. 11.
13. IEC 60034-18-34-2012; *Rotating Electrical Machines Part 18–34: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation of Thermomechanical Endurance of Insulation Systems.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 12.

14. Seri, P., Ghosh, R., Montanari, G.C. (2021). An unsupervised approach to partial discharge monitoring in rotating machines: Detection to diagnosis with reduced need of expert support. *IEEE Trans. Energy Convers*, 36, 2485–2492.
15. Xu, X., Yan, X., Yang, K., Zhao, J., Sheng, C., Yuan, C. (2021). Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transp. Saf. Environ*, 3, 85–102.
16. DSTU ISO 10816-1:2007. Vibratsiia. Kontrol stanu mashyn za naslidkamy vymyriuvan vibratsii na chastynakh, shcho ne obertaiutsia. Chastyna 1. Zahalni vymohy.
17. Han, J., Li, X. D., Yu, D.Y. et al. (2012). Application of rough set based fuzzy neural network in fault diagnosis. *J Hefei Univ Technol Nat Sci*. 35:577–80.
18. P. Balasubramaniam and N. Ramesh Babu. *Fuzzy Logic Controllers and Applications*. eBook (PDF) ISBN 978-0-85014-875-6. 2025 p. 126.
19. Sano, T. (2015). Diagnostic Frequency Response Analysis (FRA) Techniques for Faults in Transformers. *MEIDEN REVIEW*, vol. 7, no. 1, pp. 28–33.

Tymofeiev K. V., Voronenko S. V., Lebedenko Y. O. FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF SHIPBOARD HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL MACHINES

The article is devoted to the development of methods for the functional diagnostics of high-voltage electrical machines and their practical application in maritime transport. An analysis of the main approaches to the development of diagnostic techniques and tools for electrical machines demonstrates the feasibility of using integrated functional diagnostics. The set of diagnostic parameters must meet the requirements of completeness of description of all classes of defects, maximum sensitivity to changes in the values of structural parameters, minimum composition, accessibility for control and measurement, minimum cost and time of control and measurement, sufficient resolution in recognizing individual defects. The analysis of diagnostic parameters made it possible to form an effective set that includes parameters of vibration, temperature, current consumption and capacitance, and electro-discharge activity. The most effective application of these methods is the joint use of an integrated diagnostic system.

An algorithm for the complex functional diagnostics of shipboard high-voltage electrical machines has been developed. The structure for the system for diagnosing the technical condition is proposed, which allows to implement the developed diagnostic algorithm and is characterized by constructive simplicity and reliability. The complex diagnostics of high-voltage electrical machines can be formalized by means of models of classification of the technical condition and fault finding based on the results of classification. A fuzzy model for classifying the technical condition in the form of predicate rules has been developed, which allows determining the technical condition of an object based on the results of measuring the parameters of electrical discharge activity and the rms value of vibration velocity. Five classes of technical condition of the object are defined: “Normal”, “Normal with deviations”, “Normal with significant deviations”, “Deterioration” or “Pre-emergency”. A fault detection model was developed and implemented using fuzzy logic.

The model makes it possible to detect faults in an object based on the measured values of current and vibration amplitudes at characteristic frequencies, as well as temperatures at control points. A method using a fuzzy model is proposed that searches for faults by the relative deviations of current and vibration amplitudes at characteristic frequencies, as well as temperatures at control points. The algorithm for assessing the technical condition allows to determine the current technical condition of the facility using a fuzzy logic apparatus based on the results of measuring the parameters of electrical discharge activity and the root mean square value of vibration velocity. In the case of a pre-emergency condition, a signal is generated to shut down the electrical machine. The algorithm for fault detection of shipboard high-voltage electrical machines is applied on a fuzzy logic model. The algorithm determines the causes of electrical machine failure based on the results of thermal imaging and spectral analysis of the supply current and vibration.

Key words: diagnostics; electrical machine; defect; technical condition; measurement; electrical discharge activity; vibration; spectrum; fuzzy logic; model.

© Тимофеев К. В., Вороненко С. В., Лебеденко Ю. О.

Статтю прийнято до редакції 19.05.2025