

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

На правах рукопису

МИСЛОВИЧ МИХАЙЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

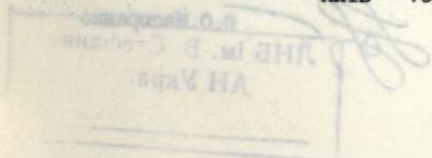
НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-
-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ СТАТИСТИЧНОЇ
ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Спеціальність 05.11.16 - Інформаційно - вимірвальні
СИСТЕМИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1995





Ав 32.949

Дисертація є рукопис.

Роботу виконано у відділі моделювання машин змінного струму Інституту електродинаміки НАН України, м.Київ.

Науковий консультант - доктор фізико-математичних наук,
професор

Марченко Борис Григорович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Губарь Валентин Іванович

доктор технічних наук, професор
Запорожець Володимир Васильович

доктор фізико-математичних наук
Яворський Ігор Миколайович


Провідна організація - Відділення гібридних моделюючих та керуваних систем ^{в енергетиці} Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України, м.Київ.

Захист відбудеться "10" жовтня 1995 р., в 11 годин, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.98.03 в Інституті електродинаміки НАН України (252680, Київ-57, пр.Перемоги, 56).

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України.

Автореферат розіслано "5" вересня 1995 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 01.98.03


Д.О. Маспенко
ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми і ступінь дослідження тематики. В зв'язку з обмеженими енергетичними можливостями України особливо актуальними стають проблеми підвищення надійності електротехнічного обладнання, що експлуатується. Одним із способів, який дозволяє значно підвищити надійність такого обладнання є застосування сучасних методів і засобів контролю та діагностики.

Існують різні методи та засоби діагностики технічного стану вузлів електротехнічного обладнання, що їх реалізують, які достатньо добре викладені у відомих літературних джерелах. Останнім часом з'явився ряд нових напрямків і методів, які використовуються при розв'язку задач діагностики. Серед таких напрямків найбільш оформувалась обчислювальна, або комп'ютерна діагностика, яка базується на застосуванні нових інформаційних технологій для обробки діагностичної інформації на ЕОМ. Слід відмітити також появу робіт, пов'язаних зі створенням експертних систем технічної діагностики, які здатні обробляти не лише кількісні дані, але й різноманітні знання.

Невід'ємною частиною інформаційно-виміральної системи (ІВС) технічної діагностики є безпосередньо сам об'єкт діагностики. Для впевненого проведення діагностики того чи іншого вузла дослідника, з одного боку, необхідно мати математичну модель, яка на основі фізики явищ достатньо достовірно описувала б вимірювані процеси, що виникають в досліджуваних вузлах, а, з іншої сторони, потрібно мати ІВС, побудовану з врахуванням апріорних даних про інформаційні сигнали, які можуть бути отримані в результаті аналізу математичної моделі досліджуваних процесів. При цьому в хронологічному плані модель є первинною, а методи (детерміновані або стохастичні) покладені в основу ІВС, що використовується, - вторинними, оскільки вони розробляються відносно вибраної моделі.

Аналіз робіт вітчизняних і зарубіжних авторів показав, що переважна більшість відомих ІВС та пристроїв діагностики створювались безпосередньо на замовлення енергопідприємств, без належної наукової проробки багатьох теоретичних та прикладних питань. Особливо це стосується ІВС, в основу яких закладені статистичні методи обробки інформаційних сигналів. Разом з тим, як

стверджують такі спеціалісти в галузі технічної діагностики, як П.П.Пархоменко, О.В.Мозгалевський, В.А.Гуляев, В.І.Попков та ін., використання статистичних методів обробки інформаційних сигналів є найбільш обґрунтованим порівняно з детермінованими методами, оскільки багато фізичних процесів, що виникають у вузлах електротехнічного обладнання, які діагностуються, носять випадковий характер по своїй природі.

На основі проведеного аналізу цілого ряду наукових робіт, а також з врахуванням наукових результатів, отриманих автором даної роботи, можна стверджувати, що при створенні ІВС діагностики електротехнічного обладнання необхідно використовувати статистичні методи обробки інформаційних сигналів, тобто в основу такої ІВС повинна бути закладена ймовірнісна математична модель. Крім того, при створенні такої ІВС потрібно виходити з того, що діагностування технічного стану вузлів електротехнічного обладнання є комплексним завданням, яке включає:

- побудову математичних ймовірнісних моделей інформаційних сигналів (процесів), що виникають в діагностованих вузлах;
- теоретичне обґрунтування можливих діагностичних ознак;
- розробку програмно-технічного забезпечення для ІВС діагностики;
- вибір діагностичних просторів та формування в цих просторах навчальних сукупностей;
- побудову розв'язуючих правил діагностики і класифікації конкретних видів дефектів вузлів електротехнічного обладнання.

Проведений огляд відомої літератури з технічних і прикладних аспектів ІВС діагностики електротехнічного обладнання дав можливість констатувати, що на сьогодні відсутня єдина теорія таких ІВС, в якій у вигляді математичної моделі враховувалась би специфіка діагностованого електротехнічного обладнання, а також була б створена база для програмно-технічного забезпечення, вибору діагностичних просторів, формування в цих просторах навчальних сукупностей, і, нарешті, побудови розв'язуючих правил діагностики і класифікації конкретних видів дефектів.

Таким чином, розробка основних положень теорії ІВС статистичної діагностики є важливою науковою та народногосподарською проблемою, яка обумовила тему даної дисертаційної роботи.

Мета роботи полягає в розробці основних положень теорії інформаційно-виміривальних систем статистичної діагностики електротехнічного обладнання.

Виконання сформульованої мети досліджень здійснювалось в двох напрямках.

Перший напрямок включав розробку математичних ймовірносних моделей фізичних процесів, які виникають в діагностованих вузлах електротехнічного обладнання, що дозволило теоретично обґрунтувати можливі діагностичні ознаки технічного стану електротехнічного обладнання.

Другий напрямок передбачав:

- створення загальної методології, пов'язаної з вибором діагностичних просторів, формуванням в цих просторах навчаючих сукупностей і побудовою розв'язуючих правил по діагностиці і класифікації конкретних видів дефектів електротехнічного обладнання;

- розробку програмно-технічного забезпечення для макетів ІВС статистичної діагностики;

- проведення експериментальних досліджень з метою визначення кількісних оцінок меж діагностичних ознак.

Об'єктом дослідження є ІВС статистичної діагностики електротехнічного обладнання. Методологія застосування розроблених ІВС ілюструється на прикладах діагностики підшипників кочення і шктованих магнітопроводів електричних машин, а також циліндро-поршневих груп (ЦПГ) дизель-електричних генераторів.

Методи досліджень. В роботі застосовувались методи теорії ймовірностей, математичної статистики, теорії лінійних систем, а також деякі методи обчислювальної математики і теорії розпізнавання образів.

Наукова новизна. В процесі розробки теми дисертаційної роботи розв'язана задача створення наукових основ теорії інформаційно-виміривальних систем статистичної діагностики електротехнічного обладнання.

При цьому сам об'єкт, а також ІВС, що здійснювала діагностику цього об'єкту, розглядалася як єдине ціле. Такий підхід дозволив отримати ряд нових наукових результатів:

- на базі математичної теорії лінійних та періодично-корельованих випадкових процесів вперше розроблені математичні

ймовірності моделі вібрацій підшипників кочення та шихтованих магнітопроводів електричних машин, а також нерівномірності обертання валів дизель-електричних генераторів;

- на основі створених моделей теоретично і експериментально обґрунтовані діагностичні ознаки окремих вузлів електротехнічного обладнання;

- розроблений та експериментально перевірений ряд макетів ІВС статистичної діагностики, які дозволяють з наперед заданою точністю (інструментальна похибка) і достовірністю (методична похибка) проводити діагностику деяких вузлів електротехнічного обладнання;

- створені основні положення методики перевірки деяких метрологічних і точнісних характеристик ІВС статистичної діагностики;

- розроблена загальна методологія, яка дозволяє здійснювати вибір діагностичних просторів, формування в цих просторах навчаючих сукупностей і побудову розв'язуючих правил по діагностиці та класифікації конкретних видів дефектів в деяких вузлах електротехнічного обладнання.

Конкретний особистий внесок дисертанта в розробку наукових результатів, винесених на захист:

- багаторезонансні багатовходові моделі вібрацій підшипників кочення і шихтованого магнітопровода, створені на базі теорії лінійних випадкових процесів;

- модель нерівномірності обертання вала дизель-електричного генератора, створену на базі періодично-корельованих випадкових процесів;

- теоретично обґрунтовані і експериментально перевірені діагностичні ознаки, які дозволяють діагностувати:

в підшипниках кочення електричних машин

- перекося;
- пітінг зовнішніх або внутрішніх кілець, тіл кочення;
- відсутність мастила;

в шихтованих магнітопроводах

- стан пресовки пластин заліза;

в дизель-електричних генераторах

- технічний стан циліндро-поршневої групи;

- програмно-технічне забезпечення для макетів ІВС

статистичної діагностики;

- основні положення методики метрологічного контролю ІВС статистичної діагностики;

- методи вибору діагностичних просторів і формування навчачих сукупностей по результатах гістограмного, кореляційного і спектрального аналізів досліджуваних інформаційних сигналів;

- методи побудови розв'язувачих правил по діагностиці і класифікації конкретних видів дефектів в досліджуваних вузлах електротехнічного обладнання.

Теоретична та практична цінність роботи полягає в наступному:

- створена теорія, яка дозволяє науково обгрунтовано проводити розробку ІВС статистичної діагностики, які забезпечують із заданою точністю і достовірністю виявлення і класифікацію дефектів електротехнічного обладнання;

- на базі запропонованих математичних моделей та діючих макетів ІВС розроблена інженерна методика діагностування деяких вузлів електротехнічного обладнання;

- розроблені методи та ІВС, що їх реалізують, дозволяють автоматизувати процес діагностування технічного стану вузлів електротехнічного обладнання, забезпечуючи при цьому задані точність і достовірність результатів діагностики.

Реалізація роботи в народному господарстві. Основні положення теорії ІВС статистичної діагностики знайшли практичне впровадження в таких підприємствах та організаціях:

- Виробничому об'єднанні "Завод ім.Малишева" (м. Харків) у вигляді методики і макету ІВС діагностики циліндро-поршневої групи дизель-електричних генераторів типу 5Д70;

- НДІ заводу "Електроважмаш" (м. Харків) у вигляді програмного забезпечення для визначення віброакустичних характеристик потужних турбо та гідрогенераторів;

- ЛВЕО "Електросила" (м. Ленінград) у вигляді програмного забезпечення для методики вібродіагностики підшипникових вузлів електричних машин.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи обговорювалися на Міжнародній науковій конференції, присвяченій 150-річчю з дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя (м. Тернопіль, 1995), Міжнародній науково-технічній конференції "Статистичні методи в теорії

передачі та перетворення інформаційних сигналів" (Київ, 1992), Всесоюзній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в енергетиці" (Київ, 1990), Всесоюзному науково-технічному семінарі "Нові методи вібродіагностики технічного стану машин" (Каунас, 1986), 4-й Всесоюзній школі-семінарі "Проектування автоматизованих систем контролю і управління складними об'єктами" (Харків-Туапсе, 1990), Всесоюзній науково-технічній конференції "Методи представлення і обробки випадкових сигналів та полів" (Харків, 1989), Всесоюзній конференції "Вібродіагностика. Оцінка технічного стану механізмів та розділення джерел шуму. Проблеми стандартизації" (Горький, 1984), спільному засіданні секції № 1 Вченої ради АН СРСР по комплексній проблемі "Наукові основи електрофізики та електроенергетики" і секції № 2 Вченої ради АН СРСР по комплексній проблемі "Наукові основи електроенергетики" по темі "Нові методи контролю та діагностики технічного стану потужних енергетичних електромашин" (Київ, 1983), Всесоюзних та Республіканських конференціях "Статистичні методи в теорії передачі та перетворення інформаційних сигналів" (Київ-Львів, 1978-1988 рр.). Крім того, за матеріалами дисертації було зроблено більше 10-ти доповідей на різних науково-технічних конференціях та семінарах).

Публікації. Основний зміст дисертації, викладено в сорока роботах, серед яких одна монографія, шість препринтів і одне авторське свідчення.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновку, списку використаних літературних джерел, який містить 182 найменування і двох додатків. Робота містить 408 сторінок, включаючи 292 сторінки основного тексту, 82 малюнки, 6 таблиць і 2 додатки на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, визначені цілі досліджень і сформульовані основні положення, які виносяться на захист.

В першому розділі викладені результати розробки математичних моделей інформаційних сигналів, які характеризують технічний стан електротехнічного обладнання.

Проведення діагностики різних об'єктів базується на вимірюванні, перетворенні та обробці інформаційних сигналів. Ці операції над сигналами базуються на принципово відмінних способах отримання вихідного масиву даних, один з яких, теоретичний, базується на розробці математичної моделі об'єкту досліджень, а інший - на проведенні експерименту з використанням цього об'єкту.

Теоретичний спосіб отримання вихідного масиву даних полягає у виборі або розробці моделі об'єкту діагностики, яка є визначальною при побудові самої ІВС. А саме, в залежності від того, яка модель вибрана - детермінована чи стохастична - відповідно проводиться побудова детермінованої або стохастичної ІВС.

По своїй природі стохастичні моделі виявляються більш адекватними досліджуваним процесам, оскільки при діагностуванні окремих вузлів електротехнічного обладнання завжди має місце взаємний вплив процесів, що відбуваються в різних вузлах цього обладнання.

В якості математичної моделі процесів, які виникають в діагностованих вузлах електротехнічного обладнання, в роботі використовується багатомірний вектор

$$\Sigma = \Phi(N, \Phi, t), \quad (1)$$

де Σ - j -мірний вектор, компонентами якого є j вихідних функцій $\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_j(t)$; N - n -мірний вектор, компонентами якого є n входних функцій $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_n(t)$; Φ - m -мірний вектор, компонентами якого є m внутрішніх функцій об'єкту діагностики $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_m(t)$; t - час, а $\Phi(\cdot)$ - деякий в загальному випадку нелінійний функціонал від перелічених вище векторів, залежний від часу.

При стохастичному підході до побудови моделі (1) в якості математичної моделі впливу, яка задається багатомірним вектором N , використовувався клас випадкових процесів з нескінченно подільними законами розподілу. Вибір даного класу випадкових процесів, який вперше найбільш повно був досліджений в роботах П.Леві, А.М.Колмогорова, О.Я.Хінчина, обумовлений тим, що вони найбільш повно описують випадкові імпульсні впливи, які викликають вібрації в діагностованих вузлах електротехнічного обладнання або процеси акустичної емісії, які виникають в твердому тілі при його навантаженні або, наприклад, процеси виникнення електричних розрядів і пробую ізоляції при подачі високої напруги.

Вибір даного класу процесів при побудові моделей є принциповим, оскільки для нього відомий загальний вигляд канонічного представлення характеристичної функції, яка повністю задає компоненти $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_n(t)$ вектора впливів N , А, знаючи або визначивши компоненти $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_m(t)$ вектора Φ , визначаються характеристики шуканого вектора (1).

Виходячи з фізичних передумов для процесу обертання вала дизель-електричного генератора характерна деяка стохастична періодичність, тобто, коли деякі ймовірнісні характеристики сигналів поводять себе періодично, хоч їх реалізації періодичними бути не зобов'язані. Для математичного опису таких процесів запропоновано використати клас періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП).

Розглянуті основні властивості і характеристики процесів з нескінченно подільними законами розподілу і ПКВП. Значна увага приділена процесам типу білого шуму, які надалі використовуються в якості вихідної моделі, тобто так званого породжувачого процесу, з допомогою якого здійснена побудова досліджуваних фізичних процесів.

В основу моделей формування робочих процесів, які виникають в вузлах діагностованих електротехнічних систем, покладений імпульсний (квантовий) підхід, який добре узгоджується з фізичною природою досліджуваних процесів. При цьому форма імпульсу (але не його масштаб) відображає фізичні властивості середовища, в якому вони виникають і поширюються від точки збудження до точки прийому, тобто залежить від стану діагностованого вузла. Якщо припустити, що середовище, в якому відбувається поширення описаних імпульсів впливів, є лінійним, а в якості ударів прийняти серію імпульсів, що виникають у випадкові моменти часу, то при постійних зовнішніх умовах отримаємо послідовність накладених імпульсів-відгуків, які перекриваються в часі. В точці встановлення датчика вони алгебраїчно сумуються з відповідними алгебраїчними коефіцієнтами і, таким чином, створюють лінійний процес. При цьому сам потік збуджувачих імпульсів можна розглядати як білий шум.

У другому розділі наведені результати розробки лінійних стохастичних моделей вібрацій, які виникають в підшипниках кочення і шихтованих магнітопроводах електричних машин. Вибір вібрацій в якості досліджуваних діагностичних сигналів обумовлений

результатами робіт М.В.Григор'єва, І.Г.Шубова, О.К.Явлінського, в яких показано, що вібрації чи механічні переміщення є одним з найбільш інформативних фізичних процесів, які використовуються при діагностиці електротехнічного обладнання.

Показано, що вібрації в підшипниках кочення породжуються, в основному, деяким імпульсним потоком, що виникає в результаті взаємного удару і перекочування тіл кочення по доріжках кочення внутрішнього і зовнішнього кілець підшипника.

Для пояснення багаторезонансної структури вібрацій підшипника кочення, розглянута плоска спрощена модель однорядного підшипника, який має n тіл кочення і встановленого на горизонтально розміщеному валу електричної машини. Показано, що у відповідності з методом електромеханічних аналогій, механічна схема підшипника, яка враховує маси вала і тіл кочення M, m_1, m_2, \dots, m_n , пружні зв'язки між ними C_K і C_k , $k = \overline{1, n}$ і тертя r_k , $k = \overline{1, n}$, трансформуються в еквівалентну електричну схему з індуктивностями L, L_1, L_2, \dots, L_n , ємностями C_k , $k = \overline{1, n}$ і опорами R_k , $k = \overline{1, n}$. Елементи L_k, C_k і R_k утворюють в еквівалентній схемі своєрідні RLC-контури, здатні резонувати на певних частотах. На основі розгляду спрощеної механічної схеми підшипника показано, що він є багаторезонансною багатохводною системою. Цей факт підтверджений експериментальними дослідженнями, основні результати яких викладені в шостому розділі роботи.

При побудові моделей вібрацій шихтованого магнітопроводу в останньому не враховувалась товщина ізоляційного матеріалу між листами порівняно з товщиною зуба при забезпеченні необхідної щільності пресовки. Це дозволило зробити припущення про те, що шихтований магнітопровід виготовлений з однорідного матеріалу, який має однакову густину по всьому об'єму. В якості прикладу розглянутий процес виникнення коливань в крайньому пакеті осердя статора турбогенератора.

В процесі роботи турбогенератора відбувається поступове послаблення пресовки активної сталі і в результаті цього відшаровування пластин від шихтованого масиву осердя. При цьому власна частота коливань пластини зубця визначається довжиною частини пластини зубця, що повністю втратила контакт з шихтованим масивом осердя, і граничними умовами, які залежать від характеру закріплення пластини зубця.

На відміну від відомих моделей, в яких пластина зубця розглядається як консольно закріплений стержень, що знаходиться під впливом сил, при зміні індукції в осерді по гармонічному закону, в роботі розглянутий випадок, коли в коливаннях крайньої пластини крім детермінованої складової присутня і випадкова. Остання виникає в результаті взаємного удару розпушеної крайньої пластини (або пластин) із спресованою масою осердя магнітопроводу. В свою чергу ці взаємні удари розпушених пластин викликаються, в основному, вібраційними хвилями, які виникають в працюючій електричній машині за рахунок вібрацій підшипникових вузлів, можливого дисбалансу ротора, а також вібрацій щітко-колекторного вузла і аеродинамічного шуму. Таким чином, результуюча сила, яка впливає на крайню пластину в розпушеному пакеті, описується наступним чином

$$F(t) = f(t) + \eta'(t), \quad (2)$$

де $f(t)$ - сила, яка впливає на крайню пластину в результаті гармонічної зміни індукції, $\eta'(t)$ - вплив (породжувачий процес), який викликає випадкові коливання крайніх пластин осердя магнітопроводу.

Надалі, при проведенні діагностики аналізувалась саме складова $\eta'(t)$, яка входить в (2), котра розглядалась як потік випадкових в часі і по величині імпульсів.

Шихтований магнітопровід статора турбогенератора розглядався як механічна коливальна система, здатна резонувати на певних частотах под впливом породжувачого процесу $\eta'(t)$. Як відомо, така коливальна система може бути представлена одним або сукупністю лінійних ланок першого і другого порядку. На основі зроблених фізичних припущень, а також з використанням математичного апарату теорії лінійних випадкових процесів розглянуто представлення вібрацій подшипників кочення електричних машин і шихтованого магнітопроводу статора турбогенератора у вигляді випадкового процесу $\xi(t)$ як відгуку лінійної системи на вплив породжувачого процесу $\eta'(t)$. Така система може бути охарактеризована деяким вектором імпульсних перехідних функцій, кожна компонента якого визначається виразом

$$\Phi_j(\tau) = \frac{\omega_j^2}{\Phi_j} e^{-\beta_j \tau} \sin(\omega_j \tau) U(\tau), \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

де $\phi_j = \sqrt{\omega_j^2 - \beta_j^2}$; $\beta_j = \frac{R_j}{2L_j} > 0$; $\omega_j = \frac{1}{\sqrt{L_j C_j}}$; $\omega_j > \beta_j$.

$U(\tau)$ - одинична функція Хевісайда.

При впливі імпульсного потоку $\eta(\tau)$ на входи системи, яка визначається вектором з компонентами (3), її відгук може бути представлений у вигляді суми випадкових процесів - відгуків по кожному входу

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \xi_j(t), \quad t \in (-\infty, \infty), \quad (4)$$

де α_j - вагові коефіцієнти, які враховують затухання у відповідному каналі, $\alpha_j > 0$; n - деяке додатне число, яке визначається конструктивними, технологічними і експлуатаційними характеристиками діагностованого вузла;

$\xi_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_j(\tau, t) d\eta(\tau)$, $j = \overline{1, n}$ - лінійні випадкові процеси.

З використанням теорії лінійних випадкових процесів проведений повний (одноірний) аналіз відгуку (4) еквівалентної електричної схеми підшипника кочення і шихтованого магнітопроводу при наявності n - резонансів, тобто отримані аналітичні вирази для кореляційної і характеристичної функцій, спектральної густини потужності у випадку впливу на входи еквівалентної електричної схеми процесів типу білого шуму.

Автокореляційна функція процесу (4) з $\phi_j(\tau)$, визначеними у відповідності з (3), має вигляд

$$R(s) = \sum_{j=1}^n e^{-\beta_j |s|} \left[A_{jn} \cos \phi_j s + \beta_{jn} \sin \phi_j |s| \right], \quad (5)$$

при всіх $s \in (-\infty, \infty)$, де

$$A_{jn} = \frac{\alpha_j \omega_j^2}{2\phi_j} \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \omega_k^2 a_{kj}}{\phi_k} x_{2kj} \geq 0$$

$$B_{jn} = \frac{\alpha_j \omega_j^2}{2\phi_j} \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \omega_k^2 b_{kj}}{\phi_k} x_{2kj}.$$

α_j, α_k - вагові коефіцієнти для j -го і k -го входів,

$$\alpha_{kj} = \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \phi_{kj}^2} - \frac{\beta_{kj}}{\beta_{kj}^2 + \phi_{kj}^2} \geq 0;$$

$$D_{k,j} = \frac{\psi_{k,j}}{\beta_{k,j}^2 + \psi_{k,j}^2} + \frac{\psi_{k,j}}{\beta_{k,j}^2 + \psi_{k,j}^2} ;$$

$$\beta_{k,j} = \beta_k + \beta_j; \psi_{k,j} = \psi_k + \psi_j; \tilde{\psi}_{k,j} = \psi_k - \psi_j,$$

$\alpha_{2k,j}$ - змішаний другий семіінваріант випадкових величин $\eta_k(1)$ і $\eta_j(1)$, $\alpha_{2k,j} = \alpha_2(\eta_k(1)\eta_j(1))$, який при $k = j$ переходить в звичайну дисперсію відповідної випадкової величини.

В (5) компоненти вектора ψ_j , $j = \overline{1, n}$ названі резонансними частотами, так як вони визначають положення максимумів спектру, а компоненти вектора β_j , $j = \overline{1, n}$ - коефіцієнтами затухання. Хоча вираз (5) отримано для випадку $\psi_j > 0$, $j = \overline{1, n}$, він залишається справедливим при як завгодно близьких до нуля резонансних частотах і по неперервності може бути поширений і на випадок, коли при деякому j частота $\psi_j \rightarrow 0$. Цим виправдовується назва процесу (4) як багаторезонансної моделі.

Процес (4) є стаціонарним і гільбертовим, $R(0) < \infty$, тому для нього існує спектральна густина, яка визначається як косінус - перетворення Фур'є (5) у вигляді

$$S(\omega) = 2 \sum_{j=1}^n \frac{A_{j,n} \beta_j (\omega_j^2 + \omega^2) + B_{j,n} \psi_j (\omega_j^2 - \omega^2)}{(\omega_j^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_j^2}. \quad (6)$$

Логарифм характеристичної функції процесу (4), в припущенні, що, всі компоненти породжуючого процесу стохастично еквівалентні, має такий загальний вигляд

$$\ln f_t(u) = i u m \sum_{j=1}^n a_{j,n} + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\exp\left\{ i u x \sum_{j=1}^n a_{j,n} \varphi_j(\tau) \right\} - 1 - i u x \sum_{j=1}^n a_{j,n} \varphi_j(\tau) \right] \frac{dK(x)}{x^2} d\tau, \quad (7)$$

де $\varphi_j(\tau)$, $j = \overline{1, n}$ визначаються згідно (3), m - математичне сподівання, яке по заданій $f(u)$ можна визначити як

$$m = - \frac{d}{du} \ln f(u) \Big|_{u=0};$$

$K(x)$ - неспадна обмежена функція

$$K(x) = \frac{1}{2\pi} \lim_{y \rightarrow -\infty} \lim_{c \rightarrow \infty} \int_{-c}^c \frac{e^{-iny} - e^{inx}}{iu} \frac{d^2}{dx^2} \ln f(u) du.$$

Функція $K(x)$ називається пуасонівським спектром скачків в формі Колмогорова, при цьому вважається, що $K(-\infty) = 0$;

Вираз (7) дозволяє за відомими характеристиками породжуючого процесу з використанням перетворення Фур'є-Стільтьєса обчислювати

значення функції розподілу ймовірностей процесу (4). Поява тих чи інших дефектів в діагностованих вузлах еквівалентна зміні значень параметрів R_j, L_j, C_j в запропонованій математичній моделі (4), що в свою чергу змінює початкові і центральні моменти, а також характер кривої функції розподілу ймовірностей, отриманої на основі (7).

Таким чином, для діагностики подшипників кочення або шихтованих магнітопроводів в електричних машинах по їх вібраціях можна використати наступні діагностичні ознаки:

- коефіцієнти затухання $\beta_j, j = \overline{1, n}$;
- резонансні частоти $\phi_j, j = \overline{1, n}$;
- величини початкових і центральних моментів;
- характер кривої функції розподілу ймовірностей.

В третьому розділі розглянуті питання розробки математичних моделей, які описують нерівномірність обертання вала дизель-електричного генератора. Проведено теоретичне обґрунтування використання класу ПКВП для побудови вказаних моделей.

При побудові математичної моделі обертання вала дизель-генератора вважалось, що кут його повороту ϕ_t визначається таким чином

$$\phi_t = \phi_0 + \omega_0 t + \phi_\theta(t), \quad (8)$$

де ϕ_0 - початкова фаза, яка фіксується спеціальним датчиком мітки верхньої мертвої точки (ВМТ) і тому може бути прийнята рівною нулю, ω_0 - середня кутова швидкість, яка визначається співвідношенням $\omega_0 = \frac{\pi n}{30}$, n - число обертів вала в хвилину, $\phi_\theta(t)$ - девіація кута повороту вала.

Функція $\phi_\theta(t)$ носить випадковий характер і являє собою флуктуацію кута повороту вала в момент часу t . Саме ця функція $\phi_\theta(t)$ підлягає вивченню, оскільки несе в собі інформацію про нерівномірності обертання колінчастого вала дизеля, а, як наслідок, і про неідентичності робочих циклів в циліндрах дизеля. Із виразу (8) видно, що для процесу нерівномірності обертання колінчастого вала дизеля, а, отже, і для зміни приростів циліндрових потужностей властива стохастична періодичність, що послужило основою застосування для їх опису математичного апарату ПКВП.

При використанні моделі ПКВП для дослідження нерівномірності обертання вала дизель-генератора основним моментом є визначення

оцінки періоду ПКВП. Така модель передбачає для вимірювання кутових швидкостей (прискорень) застосування спеціальних датчиків типу ПДФ-3, які при проведенні експерименту жорстко кріпляться до вільного кінця колінчастого вала діагностованого дизеля. В цьому випадку відпадає необхідність в оцінці періоду, так як при проведенні вимірювання реалізації ПКВП на виході датчика ПДФ-3, по другому каналу синхронно проводиться реєстрація імпульсів з виходу датчика ВМТ. Маючи значення періоду, можна провести вимірювання будь-якої вкладеної послідовності відліків ПКВП, які являють собою вихідну статистику для визначення нерівномірності обертання вала.

При проведенні досліджень цієї нерівномірності, у відповідності з виразом (8) вивчалися кутова швидкість

$$\omega_t = \dot{\varphi}_t = \omega_0 + \dot{\varphi}_0(t) \quad (9)$$

і кутове прискорення

$$\omega'_t = \dot{\varphi}'_t = \dot{\varphi}''_0(t). \quad (10)$$

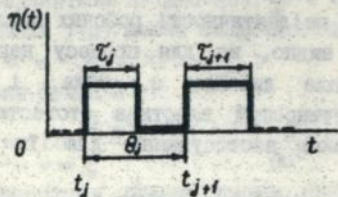
Девіацію кута повороту вала $\varphi_0(t)$ можна представити виразом

$$\varphi_0(t) = \varphi_0^H(t) + \xi(t), \quad (11)$$

де $\varphi_0^H(t)$ - детермінована складова, обумовлена роботом власне циліндрів дизеля; $\xi(t)$ - випадкова складова, для опису якої використовується ПКВП.

Для експериментального визначення ω_0 , $\dot{\varphi}_0(t)$, $\dot{\varphi}'_0(t)$, і $\dot{\varphi}''_0(t)$ використовувався датчик ПДФ-3, який виробляв послідовність імпульсів, по якій визначались оцінки вказаних характеристик. Період слідування цих імпульсів змінюється випадковим чином, відповідно нерівномірності обертання вала дизель-генератора.

В процесі обертання вала на виході ПДФ-3 формується потік імпульсів $\eta(t)$ (мал.1)



Мал. 1

При дослідженні нерівномірності обертання вала діагностованого дизеля основний інтерес представляє послідовність $(\theta_j, j = \overline{1, N})$, яка визначається як часовий інтервал між відліками. Таким чином, спостерігається послідовність значень інтервалів часу $(\theta_j, j = \overline{1, 1200})$ між рівновіддаленими значеннями кута повороту колінчастого вала. Число значень $j = \overline{1, 1200}$ визначається кількістю отворів на модуляційному диску датчика ПДФ-3, яка рівна 600, а також властивістю випробовуваного дизель-генератора 5Д70, який є чотирьохтактним, тобто повний робочий цикл у всіх 16-ти циліндрах дизеля відбувається за 2 оберти колінчастого вала.

Послідовності миттєвих кутових швидкостей ω_j , миттєвих кутових прискорень $\Delta\omega_j$ і кут повороту вала до деякого моменту часу t визначається виразами

$$\omega_j = \frac{2\pi}{600} \cdot \quad (12)$$

$$\Delta\omega_j = \omega_{j+1} - \omega_j = \frac{\theta_j - \theta_{j+1}}{\theta_j \theta_{j+1}}, \quad (13)$$

$$\varphi_t = \Delta t \sum_{j=1}^{\xi_j \leq t} \omega_j, \quad \varphi_1 = 0 \quad (14)$$

Вираз (13) являє собою відліки $\varphi''_0(t)$ - девіації прискорення, яка в усталеному режимі складається із суми детермінованої компоненти девіації $\frac{d}{dt}[\varphi_0(t)]$ і ПКВП $\xi''(t)$ з періодом T . Так як період $\xi''(t)$ співпадає з періодом робочого циклу у всіх циліндрах дизеля, то відліки $\varphi_0(t)$, взяті через цей період T , тобто

$$(\Delta\omega_j + 1200k, k = \overline{0, N-1}),$$

де N - число циклів, j - фіксоване число $1 \leq j \leq 1200$, представляють собою реалізацію стаціонарного ергодичного процесу, по якій можна будувати оцінки математичних сподівань миттєвих прискорень вала, які є слушними, тобто стають більш точними з ростом N . А саме:

$$\overline{\Delta\omega_j} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \Delta\omega_{j+1200k} = \varphi''_0(j) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \xi_{j+1200k} \quad (15)$$

$$j \in \overline{1, 1200}, \quad \overline{\Delta\omega_j} - \text{оцінки } \varphi_0(t),$$

Вихід з ладу одного або групи циліндрів діагностованого дизеля приводить до зміни кутових прискорень вала на відповідних ділянках кута його повороту. При проведенні частотного аналізу

отриманих послідовностей (15) з використанням дискретного перетворення Фур'є згідно з виразами

$$C_n = \frac{1}{1200} \sum_{j=1}^{1200} \Delta\omega_j e^{-\frac{2\pi i j}{1200}}, \quad (16)$$

$$A_n = \sqrt{(\operatorname{Re}\{C_n\})^2 + (\operatorname{Im}\{C_n\})^2} \quad (17)$$

$$\varphi_n = \operatorname{Arg}\{C_n\}, \quad n = 1, 2, \dots, 16, \quad (18)$$

де Re - дійсна частина комплексного числа, Im - його уявна частина, а Arg - аргумент, поряд з основною гармонікою, характерною для справного дизеля, з'являються ще й субгармоніки.

Використання виразів (16), ..., (18) дозволяє здійснювати діагностику стану циліндро-поршневої групи. Це реалізується наступним чином. Послідовність $\Delta\omega_j$ завжди має період, рівний T , виражений в дискретних одиницях, тобто T відповідає 1200-ам відлікам. У випадку, якщо всі циліндри працюють справно, з'являється період $T_p = T/p$, який в відліках визначається як 1200/p, де p - число однакових квантів енергії, які передаються за повний цикл роботи всіх циліндрів. Для 16-ти циліндрового дизель-генератора 5Д70, на якому проводились дані дослідження, $p = 16$. Таким чином, відсутність гармоніки на частоті $\omega = 2\pi/T$ свідчить про справну роботу циліндрів і про рівномірний розподіл циліндрових потужностей.

При втраті потужності одним чи групою циліндрів дизеля в амплітудно і фазо-частотних спектрах, які отримуються при аналізі (15), з'являються субгармоніки. Дослідження початкових фазових кутів цих субгармонік дозволяє робити висновок не лише про несправності одного із циліндрів працюючого дизеля, але і вказувати який саме з циліндрів вийшов з ладу.

Перевірка запропонованого способу діагностики циліндро-поршневої групи дизеля здійснена з використанням методів імітаційного моделювання, а також шляхом проведення експериментів, які виконувались на стендах ВО "Завод ім. Малишева". Результати останніх наведені в шостому розділі даної роботи.

В четвертому розділі на основі розроблених в попередніх розділах математичних моделей проведено теоретичне обґрунтування діагностичних ознак технічного стану електротехнічного обладнання, а також створені методи побудови статистичних оцінок цих ознак. Із

ЛІТЕРАТУРА
1. М. В. Стефанів
2. А. Н. Удальцов

аналізу запропонованих математичних моделей впливає, що найбільш доступну і достатньо повну інформацію для розв'язку задач діагностики містить кореляційна функція, спектральна густина потужності і одномірна густина розподілу ймовірностей розглядуваних процесів або величини, які по ним визначаються: частоти резонансів, екстремуми кореляційної функції, степінні моменти та ін. Розглянуті питання побудови статистичних оцінок цих параметрів.

Так, в якості грубого, але простого у визначенні наближення для резонансних частот вибираються частоти, на яких спостерігаються резонансні піки в оцінці спектральної густини (6). В загальному випадку точний розв'язок задачі статистичного оцінювання β_j і ψ_j , $j = \overline{1, n}$, які входять в (5), (6), досить громіздкий. Але якщо припустити, що породжувачі процеси для різних резонансних частот некорельовані, тобто $x_{2kj} = 0$ при $k \neq j$, (5) приймає вигляд

$$R(s) = \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_j^2 x_{2jj} \omega_j^2}{4\beta_j} e^{-\beta_j |s|} (\cos \psi_j s + \frac{\beta_j}{\psi_j} \sin \psi_j |s|), \quad (19)$$

а при $s \geq 0$

$$R'(s) = - \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_j^2 x_{2jj} \omega_j^2}{\psi_j} e^{-\beta_j s} \sin \psi_j s. \quad (20)$$

В цьому випадку у відповідності з (6) спектральна густина потужності має вигляд

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_j^2 x_{2jj} \omega_j^4}{(\omega_j^2 + \omega^2) - 4\omega^2 \psi_j^2}. \quad (21)$$

Майчи значення $R(s)$ або $S(\omega)$ при різних s і ω по (19), ..., (21) будується система лінійно незалежних рівнянь відносно невідомих числових параметрів, що в них входять, а також оцінки β_j і ψ_j , $j = \overline{1, n}$. При малих β_j значення резонансних частот ψ_j наближено визначаються по піках спектральної густини (21).

Використання густини розподілу досліджуваних сигналів дозволяє проводити діагностику електротехнічного обладнання з врахуванням вищих моментів. В результаті численних експериментів було встановлено, що математичне сподівання і дисперсія досліджуваних процесів є малоефективними діагностичними ознаками. Більш повну інформацію про характер кривої густини розподілу ймовірностей несуть третій і четвертий моменти або пов'язані з ними відомими співвідношеннями коефіцієнти асиметрії k і ексцесу

γ, які надалі використовувались в якості діагностичних ознак.

Розглянуті методи кореляційного, спектрального і гістограмного аналізу, які дозволяють отримати кількісні оцінки запропонованих діагностичних ознак.

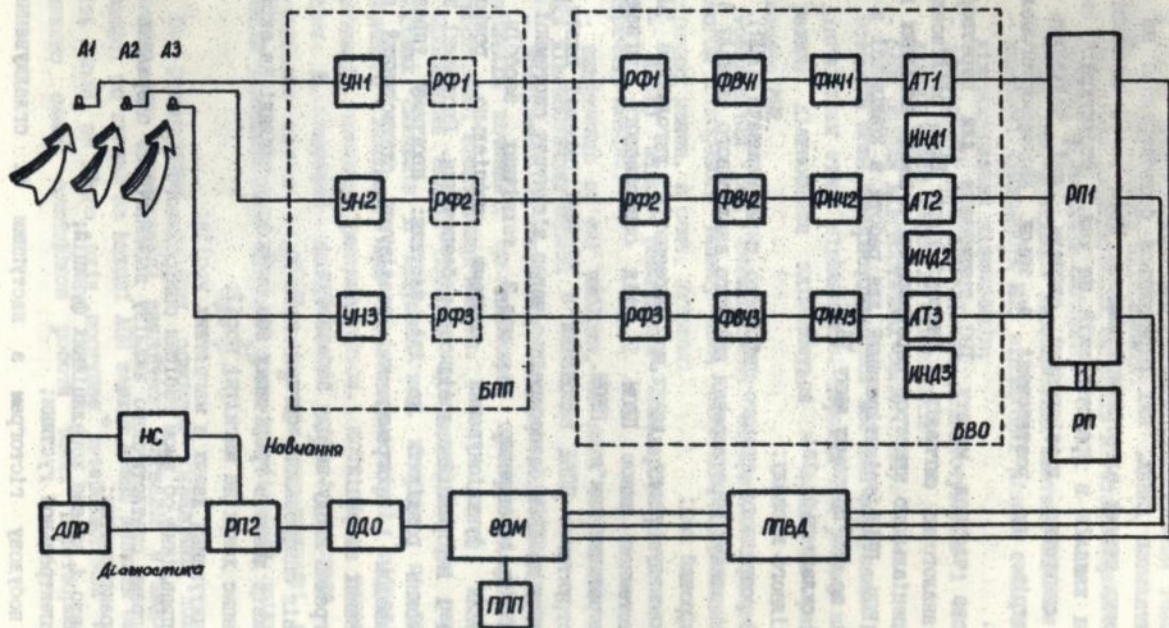
Для перевірки стаціонарності досліджуваних процесів використовувались відомі в статистиці t і F критерії. Проведення такої перевірки дозволило здійснити попередній відбір реалізацій з метою усунення промахів, які виникають при реєстрації сигналів, а також визначити інтервал I_x стаціонарності, що дає можливість підвищити достовірність діагностики.

Побудовані вирішувачі правила по перевірці гіпотез про параметри багатомірної гаусової випадкової величини. В ряді випадків до такої перевірки зводиться задача діагностики і класифікації конкретних видів дефектів в вузлах електротехнічного обладнання.

П'ятий розділ присвячений розгляду питань апаратно - метрологічного забезпечення ІВС статистичної діагностики, оцінці їх точнісних характеристик. Ці питання викладені на прикладі ІВС виробдіагностики підшипників кочення електричних машин. Розроблений макет ІВС виробдіагностики включає в себе основні програмно-технічні засоби, представлені на мал.2. В якості засобів забезпечення і управління у вказаному макеті використовується пакет робочих програм спектрально-кореляційного і гістограмного аналізу, програми попередньої фільтрації. Характерною особливістю розробленого макету від відомих ІВС і приладів є наявність спеціально розробленого інформаційно-довідникового забезпечення, яке включає в себе навчачі сукупності, сформовані в певних діагностичних просторах і відповідні різним технічним станам підшипників, а також вирішувачі правила по діагностуванню і класифікації дефектів в підшипниках.

Проведено роздільний розгляд аналогової і цифрової частин макету ІВС виробдіагностики. Такий підхід в подальшому був покладений в основу спеціально розробленої методики оцінки метрологічних і точнісних характеристик ІВС статистичної діагностики електротехнічного обладнання.

В аналоговій частині макету ІВС з допомогою акселерометрів А1, ..., А3, попередніх підсилювачів БПІ і багатоканалного магнітофона РП здійснюється вимірювання і реєстрація



Мал. 2

експериментальних даних, які отримуються безпосередньо на обох підшипникових вузлах електричної машини. Крім того, використання всіх трьох каналів в представленій на мал.2 структурній схемі, дозволяє синхронно досліджувати сигнали, які надходять від акселерометрів, що розташовані в трьох взаємноортогональних напрямках.

Цифрова частина макету ІВС призначена для перетворення відліків аналогових сигналів в цифрові коди. Вона реалізована у вигляді спеціального пристрою перетворення і вводу вихідних даних (ППВД) в ЕОМ. ППВД орієнтований для роботи в комплексі з ПЕОМ IBM PC AT, що має системну шину ISA.

ППВД складається із:

- вхідного каскаду;
- 12-розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який забезпечує перетворення вхідного аналогового сигналу в цифровий код;
- каскаду вводу даних, що забезпечує узгодження АЦП з системною шиною ПЕОМ і ввід оцифрованого сигналу в оперативну пам'ять ПЕОМ.

Конструктивно ППВД виконаний в вигляді окремої плати, яка приєднується до ПЕОМ безпосередньо через з'єднувач системної шини.

Крім представлених на мал.2 технічних засобів, для забезпечення функціонування системи спеціально розроблені програмне і інформаційно-довідкове забезпечення. Програмні засоби умовно можна розділити на дві частини: програму управління вводом-виводом і програми, які реалізують статистичний аналіз досліджуваних вібрацій.

Програма вводу-виводу забезпечує:

- ввід оцифрованого сигналу в ПЕОМ;
- вивід даних в графічному або цифровому вигляді на екран;
- запис даних на магнітні носії;
- зчитування даних з магнітних носіїв;
- управління об'ємом вибірки оцифрованого сигналу.

Програми статистичного аналізу забезпечують одержання оцінок таких характеристик:

- авто і взаємно кореляційних функцій;
- спектральної густини;
- побудову гістограм з наступним їх сглажуванням по

системі кривих Пірсона.

В склад розробленого програмного забезпечення також входять програми, що дозволяють здійснювати:

- перевірку досліджуваних сигналів на стаціонарність;
- цифрову фільтрацію сигналів.

Інформаційно-довідкове забезпечення системи включає в себе:

- навчачі сукупності НС, відповідні різним технічним станам діагностованих підшипників;
- розв'язучі правила ДІР по діагностуванню і класифікації деяких видів дефектів підшипників;
- блок оцінки діагностичних ознак (ОДО).

Останній може використовуватися або для формування НС, або для діагностики стану підшипників. Перехід від режиму навчання до режиму діагностики здійснюється з допомогою режимного перемикача РІЗ.

Розглянутий ряд питань, які стосуються вимірювання, з допомогою створеного макету ІВС, вібрацій підшипників кочення електричних машин, а саме, питання:

- вибір місць розміщення акселерометрів на працюючій електричній машині;

- визначення об'єму вибірки, по якій знаходяться необхідні оцінки діагностичних ознак;

- врахування і послаблення впливу вібрацій (крім вібрацій підшипників кочення), що виникають при роботі різних вузлів діагностованої електричної машини.

Проведений аналіз похибок, що виникають при перетворенні аналогових сигналів в цифровий код. Зокрема, по результатах проведеного аналізу, при розв'язку задачі вібродіагностики підшипників кочення рекомендується, щоб об'єм зареєстрованої вибірки N , частота дискретизації f_d і частота обертання внутрішнього кільця підшипника f_b при перетворенні аналогових вібрацій підшипників в цифровий код, задовільняли співвідношення

$$N = \frac{2f_d}{f_b}.$$

По результатах аналізу основних складових похибок, що виникають при перетворенні аналогових сигналів в цифровий код, показано, що сигнал на виході АЦП завжди можна вважати випадковим, навіть коли на його вхід поступає детермінований вплив. Це викликано самою специфікою роботи таких перетворювачів, що

представляють собою електронні прилади, а саме - нестабільністю рівнів спрацювання, впливом випадкових факторів при заокругленні, відходом робочих параметрів в залежності від часу, температури, напруги живлення та ін. Природньо, що такого роду похибки в реальних перетворювачах повинні оцінюватися з використанням методів математичної статистики.

Такий підхід застосований в даній роботі при визначенні деяких метрологічних характеристик пристроїв перетворення аналогових сигналів в цифровий код, який є одним із основних частин ІВС статистичної діагностики.

Характеристика квантування АЦП є нелінійною. Але, враховуючи той факт, що АЦП повинен здійснювати лінійну передачу сигналів, при великому числі рівнів квантування його можна замінити з певною похибкою ланкою з лінійною динамічною характеристикою, застосовуючи методи лінеаризації для різних класів сигналів.

При аналізі проходження через АЦП реалізацій випадкових процесів, котрими є досліджувані вібраційні сигнали, в даній роботі запропоновано використовувати метод статистичної лінеаризації, розроблений І.Е.Казаковим для систем, що описуються стохастичними диференціальними рівняннями. В застосуванні до АЦП метод статистичної лінеаризації формується наступним чином. Квантований випадковий процес $x_k(t)$ на виході АЦП, отриманий в результаті нелінійного перетворення реалізації вхідного випадкового процесу $x(t)$ апроксимується таким лінійним функціоналом від вхідного випадкового процесу, який мав би таке ж математичне сподівання і дисперсію як і вихідний квантований процес $x_k(t)$.

На основі запропонованого підходу, розроблена методика визначення деяких метрологічних характеристик пристроїв перетворення, що входить в склад ІВС статистичної діагностики. Так, зокрема, отримані основні розрахункові співвідношення для експериментальної перевірки динамічного і частотного діапазонів досліджуваного пристрою.

При здійсненні вказаних перевірок з використанням синусоїдальних тестових сигналів в пристрої перетворення виникає два види специфічних похибок:

Δ₁ - за рахунок несиметрії суми відліків на додатній і від'ємній півхвилях цілого періоду, викликаної дискретизацією;

Δ_2 - за рахунок залишку неповного періоду, викликаного дискретизацією і співвідношенням тривалості $N\Delta t$ (N - об'єм вибірки, Δt - крок дискретизації), і 2π .

Для оцінки цих помилок отримані співвідношення

$$\Delta_1 = \frac{\delta_1}{N}; \quad \Delta_2 = \frac{\delta_2}{N},$$

де

$$\delta_1 = \frac{A}{\sin \pi n f / f_d} \sin \frac{(1 - P(nf/f_d))f}{f_d} \times$$

$$\times \sin \left\{ \varphi_0 - \frac{\pi P(nf/f_d)}{f_d} \right\};$$

$$|\delta_2| < A \sin(\pi f / f_d); \quad (22)$$

$0 < \varphi_0 < \pi$; A - амплітуда сигналу; f і f_d - частота сигналу і частота дискретизації; n - число повних коливань синусоїдального тестового сигналу; $P(\cdot)$ - функція, дробова частина.

Показано, що для цього випадку сумарна помилка $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ при визначенні середнього значення гармонічного сигналу оцінюється виразом

$$|\Delta| < \frac{2A}{N} \left[\frac{\pi}{2N_0} + \frac{N_0 + 1}{\pi(2 - \pi(N_0 + 1))} \right] < \frac{A\pi}{NN_0} + \frac{2A}{\pi},$$

де $\{f_d/f\} = N_0$ - ціла частина.

На основі проведеного аналізу встановлено, що при використанні для експериментальної перевірки АЦП періодичних сигналів потрібно узгодити частоту тестового сигналу і частоту дискретизації, тобто отримати ціле число періодів в зареєстрованій реалізації.

Перевірка метрологічних характеристик макету ІВС вібродіагностики здійснювалась з допомогою спеціально розробленої методики, що ґрунтується на використанні пакету програм кореляційного і гістограмного аналізу. Проведені перевірки зводились до визначення динамічного і частотного діапазонів розробленого макету ІВС і здійснювались шляхом подачі на його входи синусоїдального тестового сигналу з відомим ефективним значенням напруги і різними фіксованими значеннями частоти. Отримані на виході пристроїв перетворення цифрові коди сигналів вводились в ЕОМ і оброблялись по програмах кореляційного і гістограмного аналізу. При проведенні даних перевірок, з метов

зниження похибок Δ_1 і Δ_2 , що визначаються згідно (22), проводилось узгодження частоти дискретизації f_d і сигналу f , а саме, було вибрано $f_d/f = 20$. Вказане узгодження дозволило знизити похибки Δ_1 і Δ_2 до неістотно малих величин.

Результати проведених перевірок макету ІВС вібродіагностики наступні:

- коефіцієнт передачі макету по ефективному значенню напруги змінюється не більше 0,23 дБ при варіації частоти вхідного сигналу від 50 Гц до 10 кГц;

- динамічний діапазон пристрою, встановлений по коефіцієнту кореляції, складає 54 дБ при відносній похибці 4%.

При оцінці похибок, у відповідності з розробленою методикою ІВС статистичної діагностики умовно розбивається на декілька частин і їх похибки оцінюються окремо, з врахуванням специфіки роботи кожної частини. Такий підхід до оцінки похибки проілюстрований на прикладі ІВС вібродіагностики.

Сумарна відносна похибка аналогової частини макету по кожному каналу обумовлена відносними похибками акселерометра, попереднього підсилювача і виміривального магнітофону і складає $1,5\% \leq \delta_{\text{ан}} \leq 12\%$. При проведенні експериментів в реальному масштабі часу (без використання магнітофону), відносна похибка аналогової частини макету ІВС по кожному з каналів складає $1,5 \leq \delta_{\text{ан}} \leq 3\%$.

Похибки, що виникають при перетворенні аналогових сигналів в цифровий код обумовлені наявністю АЦП. Для застосованого в ППВД АЦП К 1108 ПБ2, що має клас точності 0,3/0,2, середнє по діапазону вхідних напруг значення відносної похибки складає $\delta_{\text{АЦП}} < 2,1\%$.

Сумарна відносна інструментальна похибка аналогової і цифрової частин макету ІВС по кожному з каналів (при умові, що в аналоговій частині відсутній магнітофон) складає $1,5\% \leq \delta_{\text{сум}} \leq 3\%$.

Проведений аналіз методичних похибок, які обумовлені похибками заокруглення при обчисленнях, а також методами, покладеними в основу пакету програм для ЕОМ, показав, що для одержання оцінок діагностичних ознак з чотирма вірними знаками, обчислення в ЕОМ повинні проводитися з числами, заокругленими до шести десяткових розрядів. Використовувана в складі макету ІВС ПЕОМ ІЕМ РС АТ 386 забезпечує обчислення оцінок з вказаним числом десяткових розрядів.

Точність оцінок діагностичних ознак, що були отримані з допомогою ПЕОМ і пакету програм, оцінювались з допомогою нерівності Чебишева і методу довірчих інтервалів.

В шостому розділі викладені результати досліджень, основна мета яких полягала в експериментальному підтвердженні діагностичних ознак, запропонованих по результатах аналізу ймовірносних моделей процесів, що супроводжують роботу діагностованих вузлів. Експериментальне дослідження діагностичних ознак проведено на прикладі вібродіагностики підшипникових вузлів і шихтованого магнітопроводу в електричних машинах, а також діагностики циліндро-поршневих груп дизель-електричних генераторів. В останньому випадку в якості вимірюваного процесу використовувались віброшвидкості або віброприскорення вала діагностованого дизель-генератора.

Значна увага при проведенні цієї частини досліджень приділялась виділенню корисного сигналу на фоні завад. Так, на вібрації підшипників кочення в електричних машинах накладаються вібрації, породжені роботом електромагнітної системи, щітково-колекторного вузла, а також за рахунок аеродинамічного шуму і можливого дисбалансу ротора. Тому, перш ніж аналізувати вібрації підшипників, встановлених на електричних машинах, були проведені дослідження вібрацій власне підшипників кочення. Для реалізації цієї ідеї в Інституті електродинаміки НАН України була розроблена і виготовлена експериментальна установка для вібродосліджень окремих підшипників кочення, основне призначення якої наступне:

- перевірка теоретично обґрунтованих діагностичних ознак;
- імітація дефектів типу перекоп, відсутність мастила;
- дослідження дефектів типу пінтинг в зовнішньому або внутрішньому кільцях підшипників;
- дослідження кореляції вібрацій, породжених різними факторами в працюючій електричній машині і власне підшипникового вузла.

При роботі експериментальної установки на вібрації випробовуваного підшипника впливають вібрації, обумовлені власними частотами вузлів, в яких він закріплений (поворотна плита, вал установки і т.д.). Для визначення власних частот різних вузлів установки в статичному режимі проведені експериментальні

дослідження. Врахування взаємного впливу власних частот, характерних для різних вузлів установки, дозволило з більшою достовірністю провести дослідження вібрацій власне підшипників кочення.

По результатах спектрального аналізу вібрацій підшипників типу 309 і 309Ш₂, що досліджувалися на установці, були визначені смуги частот, в яких зосереджені основні складові вібрацій, характерні для власне підшипника кочення. Потім були встановлені основні частотні складові вібрацій цих же типів підшипників, що працюють в складі підшипникових вузлів електричної машини постійного струму типу П-51. Крім того, були проведені експерименти по визначенню основних частотних складових вібрацій, що збуджуються електромагнітною системою і щітково-колекторним вузлом. Результати вказаних експериментів дозволили вибрати параметри аналогової і цифрової фільтрації, яка застосовувалася перед обробкою реалізацій вібрацій на БОМ з використанням пакету робочих програм. Застосування попередньої фільтрації дозволило ослабити вплив вібрацій, породжених різними вузлами працюючої електричної машини, на вібрації підшипників і в результаті підвищити достовірність проведеної діагностики.

На основі результатів спектрального аналізу вібрацій умовно справних підшипників кочення, що випробовувалися як на спеціальній установці, так і на машині постійного струму, було встановлено наступне:

1. Наявність декількох частотних максимумів в спектрограмах вібрацій підшипників підтверджує результати третього розділу, з якого слідує, що підшипник кочення є багаторезонансною системою;

2. Характер спектрограм в значній мірі обумовлений типом і конструктивними особливостями досліджуваних підшипників.

На прикладі дослідження вібрацій підшипників кочення електричної машини П-51 продемонстровані можливості спектрально-кореляційного аналізу для діагностики. На основі проведених експериментів в якості діагностичних ознак технічного стану можуть використовуватися:

при кореляційному аналізі

- число точок екстремумів S_j , $j=1,2,\dots$ на деякому інтервалі T_n корелограми $B(s)$;

- оцінки величин коефіцієнтів затування β_j , $j=1,\dots$;

- оцінка величини коефіцієнта взаємної кореляції R вібрацій підшипників, встановлених в обох підшипникових вузлах електричної машини;

при спектральному аналізі

- оцінки основних частотних максимумів f_j , $j=1,2,\dots$ спектрограми;

- число основних частотних максимумів в фіксованій смузі частот.

На основі дослідження вищих моментів вібрацій підшипників електричних машин встановлено, що найбільш інформативними діагностичними ознаками, які дозволяють діагностувати найбільш типові дефекти підшипників є:

- оцінка коефіцієнта асиметрії k ;

- оцінка коефіцієнта ексцесу γ .

З використанням макету ІВС ударної діагностики проведені експерименти по діагностиці стану пресовки шихтованого магнітопроводу. В якості об'єкту дослідження використовувалась частина шихтованого магнітопроводу малопотужного трансформатора, встановленого в спеціальному досліджувальному стенді.

Експерименти по діагностуванню стану пресовки пластин магнітопроводу здійснювались шляхом збудження вібраційної хвилі з допомогою спеціального ударного молотка з наступним вимірюванням і аналізом (з використанням макету ІВС ударної діагностики) відгуку діагностованого магнітопроводу на вказане збудження. Ці експерименти проводились на магнітопроводі, спресованому із зусиллям 30 Нм, а потім з повністю знятим зусиллям.

Проведені експерименти підтвердили теоретичне припущення, що в якості діагностичних ознак стану пресовки шихтованого магнітопроводу можуть бути використані амплітуди і частоти основних частотних максимумів в фіксованій смузі частот.

Для дизель-генератора типу 5Д70 проведена фізична конкретизація моделі, що характеризує розподіл циліндрових потужностей на валу цього дизель-генератора.

Проведення експериментів здійснювалось з використанням дизель-генератора 5Д70, встановленого на стенді В0 "Завод ім.Малішева". Дизель-генератор працював як в режимі холостого ходу, так і в режимі навантаження. В процесі випробувань проводились вимірювання значень куткових швидкостей як для умов

справної циліндро-поршневої групи (ЦПГ), так і в випадку виходу з ладу будь-якого з циліндрів. Імітація втрати потужності циліндром здійснювалась шляхом припинення подачі палива у відповідний циліндр.

Вимірювання і наступна обробка значень кутових швидкостей вала дизель-генератора здійснювалась з допомогою спеціально розробленого макету ІВС, де в якості первинного перетворювача використовувався датчик кутових швидкостей типу ПДФ-3. Реалізації, які містять виміряні значення кутових швидкостей оброблялись на ПЕОМ з допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення, в основу якого покладені алгоритми швидкого перетворення Фур'є. В результаті цієї обробки визначаються перші 16 (по числу циліндрів діагностованого дизеля) коефіцієнтів Фур'є і відповідні їм початкові фази, які представляються у вигляді амплітудно-частотних (АЧХ) і фазо-частотних (ФЧХ) характеристик.

По результатах проведених експериментів по діагностиці ЦПГ дизель-генераторів встановлено наступне:

- в якості діагностичних ознак технічного стану ЦПГ дизель-генераторів можуть використовуватися результати аналізу АЧХ і ФЧХ кутових швидкостей вала досліджуваного дизеля;

- діагностичною ознакою наявності хоч би одного дефектного циліндра є поява субгармонік в АЧХ кутової швидкості обертання вала дизель-генератора;

- діагностику номера циліндра, що вийшов з ладу, дозволяють здійснити результати аналізу ФЧХ кутових швидкостей вала дизель-генератора.

В сьомому розділі викладені результати експериментальних досліджень, основна мета яких полягала в створенні загальної методології, пов'язаної з вибором діагностичних просторів, формуванням в цих просторах навчаючих сукупностей і побудовою розв'язувачих правил по діагностиці і класифікації конкретних видів дефектів електротехнічного обладнання. Ці питання розглянуті в застосуванні до підшипників кочення і шихтованих магнітопроводів електричних машин, а також для ЦПГ дизель-електричних генераторів.

Базуючись на експериментальних дослідженнях, результати яких викладені в шостому розділі, а саме, на отриманих кількісних оцінках границь діагностичних ознак, був проведений вибір діагностичних просторів. Потім в цих діагностичних просторах були

сформовані навчачі сукупності і побудовані вирішувачі правила по діагностиці і класифікації конкретних дефектів вузлів електротехнічного обладнання.

З використанням створених макетів ІВС статистичної діагностики і покладеного в їх основу пакету програм спектрально-кореляційного і гістограмного аналізу було оброблено і проаналізовано більше 5000 реалізацій процесів, супроводжуючих роботу діагностованих вузлів.

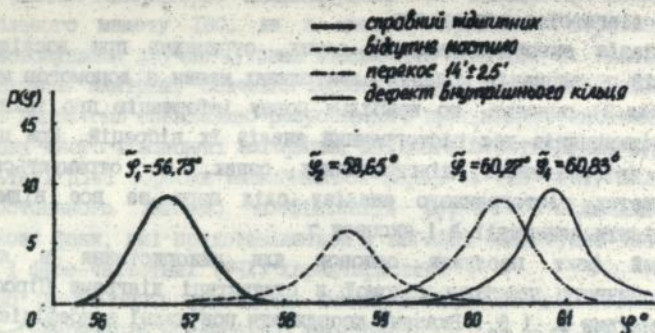
Аналіз експериментальних даних, отриманих при дослідженні вібрації підшипників кочення електричних машин з допомогою макета ІВС (мал.2) показав, що найбільш повну інформацію про технічний стан підшипників дає гістограмний аналіз їх вібрацій. При цьому, серед інформативних діагностичних ознак, що отримуються по результатах гістограмного аналізу слід перш за все відмітити коефіцієнти асиметрії k і ексцесу γ .

Цей факт послужив основою для використання в якості діагностичного простору відомої в статистиці діаграми Пірсона з координатами β_1 і β_2 . Вказані координати пов'язані з коефіцієнтами асиметрії k і ексцесу γ такими співвідношеннями $\beta_1 = k^2$, $\beta_2 = \gamma + 3$.

На основі дослідження характеру поведінки образів, сформованих в діагностичному просторі (β_1 , β_2) по оцінках параметрів β_1 і β_2 вібрацій підшипників і відповідних як справним підшипникам, так і з перекосами, пітінгом зовнішнього або внутрішнього кілець і що працюють без мастила, було встановлено, що в більшості випадків для побудови розв'язувачих правил по діагностуванню вказаних дефектів доцільно відобразити точки площини (β_1 , β_2) в точки прямої по закону $\varphi = \sigma \text{ctg} \frac{\beta_2 + 3}{\beta_1 + 4}$.

На мал.3 в якості прикладу приведені згладжувачі криві, які побудовані по гістограмах оцінки φ , отриманих по вібраціях підшипника ЗОРЕШ₂, що випробовувався при різних технічних станах на електричній машині постійного струму типу П-51. Як видно з мал.3, розподіли оцінки φ , відповідні різним технічним станам випробовуваного підшипника, зміщені один відносно одного і мають різні математичні сподівання: $\tilde{\varphi}_1 = 56,73^\circ$; $\tilde{\varphi}_2 = 58,65^\circ$; $\tilde{\varphi}_3 = 60,27^\circ$; $\tilde{\varphi}_4 = 60,83^\circ$. Отримані згладжувачі криві відносяться до XII, IV або VII типам кривих, що входять в систему Пірсона, тобто можуть бути апроксимовані нормальним законом розподілу. Для побудови розв'язувачих правил при діагностуванні дефектів в підшипнику по

навчачих сукупностях, наведених на мал.3, в роботі використовується класична двоальтернативна процедура перевірки статистичних гіпотез по Нейману-Пірсону, яка для нормального розподілу описується відносно простими аналітичними виразами.



Мал. 3

Розглянуті питання вібродіагностики підшипників кочення з використанням результатів спектрально-кореляційного аналізу.

По аналогії з наведеним вище прикладом в роботі викладені принципи вибору діагностичних просторів, формування в цих просторах навчачих сукупностей, планування експерименту і побудови розв'язуючих правил по діагностиці стану пресовки шихтованих магнітопроводів, а також діагностики ЦПГ дизель-електричних генераторів.

На основі отриманих в роботі результатів розроблена методика діагностування вузлів електротехнічного обладнання, що реалізується з допомогою ІВС статистичної діагностики.

В додатках наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи і деякі результати обробки експериментальних даних.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В процесі розробки теми дисертаційної роботи вирішена важлива народногосподарська проблема створення наукових основ теорії інформаційно-вимірвальних систем статистичної діагностики електротехнічного обладнання. Основні положення цієї теорії включають в себе наступні нові наукові результати, отримані в даній роботі.

1. На основі теорії лінійних і періодично-корельованих випадкових процесів зперше розроблені математичні ймовірносні моделі вібрацій підшипників кочення і шихтованих магнітопроводів електричних машин, а також нерівномірності обертання валів дизель-електричних генераторів.

2. Вперше на основі ймовірносного аналізу розроблених моделей теоретично обгрунтовані і експериментально перевірені діагностичні ознаки технічного стану досліджуваних вузлів.

3. Створено і експериментально перевірено ряд макетів ІВС статистичної діагностики, які дозволяють з наперед заданими точністю (інструментальна похибка) і достовірністю (методична похибка) проводити діагностику деяких вузлів електротехнічного обладнання.

4. Розроблені основні положення методики перевірки метрологічних і точнісних характеристик ІВС статистичної діагностики.

5. Вперше розроблена загальна методологія, яка дозволяє здійснювати вибір діагностичних просторів, формувати в цих просторах навчачі сукупності і проводити побудову розв'язувчих правил по діагностиці і класифікації конкретних дефектів вузлів електротехнічного обладнання.

6. На основі розроблених математичних моделей і діючих макетів ІВС створена інженерна методика, що дозволяє діагностувати підшипники кочення і шихтовані магнітопроводи електричних машин, а також стан циліндро-поршневої групи дизель-електричних генераторів.

Сукупність розглянутих в даній дисертаційній роботі питань і отриманих результатів представляє собою, крім вирішення проблеми створення наукових основ теорії інформаційно-вимірвальних систем статистичної діагностики, ще й загальну методологію по проведенню діагностики різних електромеханічних систем.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин.-Киев: Наукова думка, 1992.- 195 с.

2. Мыслович М.В., Марченко Б.Г., Проценко Л.Д. Процессы с безгранично делимыми законами распределения как модели информационных сигналов.-Киев: Знания, 1979.- 35 с.

3. Мыслович М.В., Приймак Н.В., Щербак Л.Н. Периодически коррелированные случайные процессы в задачах обработки акустической информации.-Киев: Знания, 1980.- 25 с.

4. Мыслович М.В. Использование корреляционного анализа в виброакустической диагностике подшипников качения энергетических электромашин. -В кн. Надежность энергетических электромашин.-Киев: Наукова думка, 1981.-с.39-46.

5. Мыслович М.В. Использование некоторых статистических параметров виброакустического шума для диагностики подшипников качения электрических машин. В кн. Надежность и диагностика энергетических электромашин.-Киев: Наукова думка, 1984, с.81-87.

6. Мыслович М.В., Красильников А.И. Использование кусочно-линейного преобразователя акустических сигналов для диагностики узлов электрических машин. В кн. Надежность энергетических электромашин.-Киев: Наукова думка, 1981.- с.73-80.

7. Мыслович М.В., Марченко Б.Г., Проценко Л.Д. Характеристики случайного процесса, получение с помощью формирующего RLC-фильтра. -В кн.: Пространственно-временная обработка сигналов и учет влияния среды их распространения.- Харьков: Изд-во ХАИ, 1980.- с.47-49.

8. Мыслович М.В., Осадчий Е.П. Использование статистического спектрального анализа в виброакустической диагностике подшипников качения электрических машин. Техн. электродинамика. -1983.-№ 3.-С.58-64.

9. Мыслович М.В., Марченко Б.Г., Проценко Л.Д. Автокорреляционные и характеристические функции виброакустического шума подшипников качения электрических машин и возможности корреляционного анализа для диагностики. Техн. электродинамика. -1982.-№ 1.-С.76-83.

10. Мыслович М.В., Марченко Б.Г., Гончарук Е.С., Осадчий Е.П.

Модель линейного RLC-шума в задачах статистического моделирования работы узлов электрических машин. Техн. электродинамика. -1981.-№ 1.-С.50-56.

11. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Диагностирование подшипников качения электрических машин с использованием третьего и четвертого моментов их вибраций. Техн. электродинамика. -1986.-№ 5.-С.50-56.

12. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Некоторые особенности построения решающих правил при проведении вибродиагностики подшипников качения электрических машин. -В кн.: Физико-технические проблемы надежности электрических машин.-Киев: Наукова думка, 1986.- с.19-26.

13. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Особенности применения процедуры Неймана-Пирсона при диагностировании электрических узлов радиотехнических систем. -В кн.: Статистические методы обработки информации в авиационных радиоэлектронных системах.-Киев: Изд-во КИИГА, 1987.- с.21-26.

14. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Формирование обучающих совокупностей по реализациям вибраций с использованием диаграммы Пирсона. Межвузовский тематический сборник научных трудов "Вибротехника", № 1 (58).-Каунас: Изд-во Каунасского политехнического института им. Антанаса Снечкуса, 1987.- С.61-65.

15. Мыслович М.В., Марченко Б.Г., Красильников А.И. Математическая модель линейного случайного процесса в обосновании диагностических признаков при вибродиагностике подшипников качения. -Межвузовский тематический сборник научных трудов "Вибротехника"- № 2 (59).-Каунас: Изд-во Каунасского политехнического института им. Антанаса Снечкуса, 1987.- с.31-37.

16. Мыслович М.В., Марченко Б.Г., Зварич В.Н. Стохастические периодические случайные процессы как модели информационных сигналов.- Изв. ВУЗов, Радиозлектроника. -1995.- № 1.- С.46-51.

17. Мыслович М.В., Марченко Б.Г. Анализ переходных режимов в колебательных системах при воздействии белого шума. Техн. электродинамика.- 1989.- № 3. с.58-64.

18. Myslovitch M.V., Krasilnikov A.I., Martchenko B.G. A mathematical model of linear random processes in substantiation of diagnostics criteria in vibratory diagnostics of rolling-contact bearings. Hemisphere Publishing Corporation, Vibrating Engineering.- 1989. -3, № 2, p.205-211.

19. Myslovitch M.V., Martchenko B.G., Zvaritch V.N. White Noise in Information Signal Models. Pergamon Press Ltd., Applied Mathematics Letters.- 1994.- Vol. 7, № 3, p.93-95.

20. Myslovitch M.V., Martchenko B.G., Zvaritch V.N. The Models of Random Periodic Information Signals on the White Noise Bases. Pergamon Press Ltd., Applied Mathematics Letters.- 1995.- Vol.8 № 3, p.87-89.

21. Мислович М.В., Береговой А.И., Быстриков А.Ф., Котвицкий Н.Н., Марченко Б.Г., Осадчий Е.П. Вибродиагностика электрических машин. Статистический подход и устройство. (Препр. АН УССР. Ин-т электродинамики; № 364).- Киев, 1984.- 56 с.

22. Мислович М.В., Марченко Б.Г. Белые шумы в колебательных системах.- (Препр. АН УССР. Ин-т электродинамики; № 599). Киев, 1989.- 42 с.

23. Мислович М.В., Марченко Б.Г., Целина В.Н. Ударная диагностика шихтованных магнитопроводов.- (Препр. АН Украины. Ин-т электродинамики; № 745). Киев, 1993.- 40 с.

24. Мислович М.В., Проценко Л.Д. Линейные случайные процессы в задачах виброакустической диагностики технических систем.- (Препр. АН УССР. Ин-т электродинамики; № 291). Киев, 1982.- 22 с.

25. Мислович М.В., Баранов Г.Л., Марченко Б.Г., Проценко Л.Д., Осадчий Е.П. Способ диагностики подшипников качения. А.с. 1275251.- СССР.- Булл. изобр. 1986 № 45.

Особистий внесок здобувача в роботах, написаних в співавторстві, полягає в наступному: результати робіт [1-3,7,9,10-23] належать авторам в рівній мірі; в роботах [6,8,24] здобувачу належить постановка наукової задачі, шляхи її вирішення, аналіз отриманих результатів; в роботі [25] внесок здобувача визначений довідками про творчу участь в створенні винаходу.

Здобувач



М.В. Мислович

Мыслович М.В. Научные основы теории информационно - измерительных систем статистической диагностики электротехнического оборудования.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.16 - информационно - измерительные системы, Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 1995.

Защищается 39 научных работ и авторское свидетельство, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования по созданию ИИС статистической диагностики. Впервые разработана общая методология, которая позволяет осуществлять выбор диагностических пространств, формировать в этих пространствах обучающие совокупности и производить построение решающих правил по диагностике и классификации конкретных дефектов узлов электротехнического оборудования.

Myslovitch M.V. The Scientific Bases of the Informational Measuring System's Theory of Statistical Diagnostics of the Electroengineering Equipment.

Doctoral Degree in Technical Sciences on the 05.11.16 Speciality - Informational Measuring Systems, Institute of Electrodynamics of the Ukrainian National Academy of Sciences. Kiev, 1995.

39 scientific works and 1 patent, which contain theoretical and experimental research of informational measuring system's elaboration are defended. The general methodology, which make it possible: to select diagnosis spaces, to form in this spaces of training aggregates and to construct decisive rules for diagnosis and classification of the specific failures of the electroengineering equipment has been elaborated.

Ключові слова: інформаційно-вимірвальна система, статистична діагностика, електротехнічне обладнання.

Підписано до друку 28.07.95р формат 60x84/16
Папір офсетний. Умовн.-друк. аркуш. 2,0.
Об.-вид.аркуш 2,0. Тираж 80. Замовл. 348.

Поліграф.дільня. Інституту електродинаміки АН України,
252680, Київ-57, проспект Перемоги, 56

2HE.3E8A

32.957

454812

AB 32.949

AB 32.949

42818