

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Мигущенко Руслан Павлович



УДК 621.317.1

**МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ СИСТЕМ БАГАТОПАРАМЕТРОВОЇ
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ
(ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ)**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Щапов Павло Федорович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заслужений діяч науки і техніки України

Большаков Володимир Борисович,
Національний науковий центр «Інститут метрології», м. Харків, головний науковий співробітник

доктор технічних наук, професор

Куц Юрій Васильович,
Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних систем

доктор технічних наук, професор

Кучерук Володимир Юрійович,
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, завідувач кафедри метрології та промислової автоматики

Захист відбудеться « 12 » березня 20_15 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 30 » січня 20_15 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. М. Глоба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із напрямів підвищення якості та експлуатаційної надійності технічно і технологічно складної промислової продукції, особливо, якщо вона енергонасичена і має динамічні властивості, є удосконалення методів, приладів та інформаційно-вимірювальних технологій контролю і функціональної діагностики. Така продукція (дизельні і газотурбінні двигуни, будівельні, дорожні, сільськогосподарські машини і механізми, технологічні агрегати, енергетичне обладнання та ін.) найбільш затребувана в промисловості і відображає рівень наукового і промислового розвитку держави. Як багатомірний об'єкт контролю, подібна продукція характеризується широким спектром і значною невизначеністю динамічних властивостей і параметрів, що ускладнює навчання систем контролю і діагностування, знижуючи вірогідність останніх, що не сприяє забезпеченню вимог з надійності, особливо при довготривалій експлуатації об'єктів.

Підвищення вірогідності та параметричної надійності функціональної діагностики вібраційних об'єктів, як складних об'єктів з випадковими динамічними властивостями – це багатопланова, комплексна наукова проблема, вирішення якої визначається як обсягом і точністю отримання первинної вимірювальної інформації, так і правильністю перетворень останньої в логічні висновки відносно фактичного технічного стану об'єкту.

Вказана проблема останнім часом знаходиться під пильною увагою Держави, у зв'язку з чим її вирішення увійшло до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України (Закон України від 12.10.2010 № 2519-17, постанова Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 № 942, наказ МОН України від 07.06.2011 №535).

Існуючі теоретичні підходи до підвищення ефективності контролю технічного стану вібраційних об'єктів мають ряд обмежень на класи діагностованих об'єктів, види їх технічних станів, моделі інформаційно-вимірювальних перетворень і прийняття рішень в умовах апріорної невизначеності базових контрольованих показників. Тому підвищення інформаційної ефективності і статистичної вірогідності функціональної діагностики вібраційних об'єктів зі стохастичними властивостями є актуальною проблемою, яка визначила напрямок дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація є результатом виконання тематики кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»). Здобувач, як виконавець, брав участь у науково-дослідних держбюджетних роботах МОН України: «Дослідження наукових проблем метрологічного забезпечення динамічного бездемонтажного самоконтролю інтелектуальних інформаційно-керуючих систем» (ДР №0103U001539); «Підвищення точності інформаційно-вимірювальних та управляючих систем засобами бездемонтажного тестового контролю» (ДР №0106U001514); «Підвищення точності вимірювальних перетворювачів засобами вбудованого тестово-

го контролю» (ДР №0109U002421); «Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій» (ДР №0111U002280); «Розробка методів та макетів приладів для неруйнівного контролю якості виробів із зменшеними втратами енергії і матеріалів» (ДР №0113 U 000444). Здобувач, як виконавець, брав участь у госпдоговірній НДР «Розробка багатоканального терморегулятора для кондиціонера 1К38 з підвищеною електромагнітною стійкістю» (ТОВ «НВФ ДКБ Холодмаш», Харків, 2013 – 2014 рр.), у договорах про наукове співробітництво між НТУ «ХПІ», Державним підприємством «Харківський бронетанковий завод» (2013 – 2014 рр.) та Державною установою «Інститут загальної та невідкладної хірургії ім. В.Т. Зайцева НАМН України», Харків, (2014 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення інформаційної ефективності, вірогідності і надійності методів і пристроїв вібраційної функціональної діагностики в умовах невизначеності діагностичних рішень при контролі технічного стану функціонально-складних об'єктів.

Для досягнення мети в роботі поставлені наступні задачі:

- розробити і проаналізувати інформаційні моделі діагностичних рішень з урахуванням ризиків діагностики та апріорної невизначеності контрольованих параметрів і випадкових факторних впливів, включаючи похибки первинних вимірювань;

- удосконалити класифікацію показників ефективності діагностування, що враховують обмеження вимірювальної інформації при синтезі моделей вирішувальних функцій;

- розвинути теорію неперервного вейвлет-перетворення локально-нестационарних вібросигналів і розробити метод локально-регресійного аналізу випадкових послідовностей вейвлет-коефіцієнтів для виявлення з максимальною вірогідністю спектральних локалізованих змін вібросигналів;

- розробити теорію і методи параметричної вібродіагностики, які ґрунтуються на оптимізації, за максимумом вірогідності, багатомірного простору інформативних вейвлет-параметрів вібросигналів;

- розвинути теорію виявлення змін властивостей сигналів і динамічних систем з використанням критеріальних кумулятивних статистик з метою планування локально-регресійних перетворень і корекції діагностичних рішень;

- удосконалити теорію та методи аналізу і контролю систематичних похибок резервованих і просторово орієнтованих віброперетворювачів у системі функціональної діагностики багатоальтернативних технічних станів;

- розвинути теорію розробки низькочастотних та інфранизькочастотних п'єзовіброперетворювачів для отримання структурної і інформаційної надмірності при контролі вібросигналів і діагностиці апріорно невизначених технічних станів.

Об'єктом дослідження є процес виникнення невизначеності результатів функціональної діагностики вібраційних об'єктів в умовах апріорної випадковості механічних факторних впливів.

Предметом дослідження є методи і пристрої, що забезпечують підвищення вірогідності і надійності функціональної діагностики об'єктів з просторовою механічною структурою за їх механічними вібраціями.

Методи дослідження. Науково-методичну основу дисертації складає системний підхід при пошуку рішень проблеми створення теоретичних основ підвищення інформаційної ефективності та вірогідності технічного діагностування об'єктів з динамічними властивостями. Базовими методами теоретичних досліджень є як класичні, так і принципово нові сучасні методи теорії ймовірності, випадкових процесів, багатомірного статистичного аналізу, інформаційної теорії вимірювань і контролю. В основу експериментальних досліджень покладені методи планування наукового експерименту, які враховували статистичну неоднорідність початкових умов і рівнів впливових факторів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблені інформаційні моделі діагностичних рішень, які враховують переважну більшість ризиків діагностування, апіорні ймовірності станів об'єкту і похибки вимірювань значень його інформативних параметрів, що дозволило визначити умови забезпечення максимальної вірогідності діагностики при варіюванні розмірності вектора вхідних сигналів і інформаційній невизначеності його складових;

- вперше розроблені теорія і метод локального регресійного аналізу тривимірних вейвлет-зображень вібросигналів і доведена можливість отримання додаткової діагностичної інформації з урахуванням значень параметра масштабу при аналізі локальних спектральних змін;

- вперше розроблені теорія і конструкції низькочастотних та інфранизькочастотних п'єзоелектричних віброперетворювачів, що дозволило отримати додаткову діагностичну інформацію в низькочастотному діапазоні вібросигналів і підвищити, за рахунок цього, вірогідність контролю і діагностики вібраційних об'єктів в існуючих інформаційно-вимірювальних системах;

- отримала розвиток теорія локалізованого спектрального аналізу (вейвлет-аналізу) і розроблений метод побудови математичних моделей вібродіагностики, що враховує інформаційні властивості вейвлет-коефіцієнтів неперервного вейвлет-перетворення спектрально-нестационарних вібросигналів;

- отримали розвиток теорія і методи оптимізації простору інформативних параметрів, що забезпечують максимум вірогідності функціональної діагностики з урахуванням невизначеності значень вейвлет-коефіцієнтів і обмеженнях на обсяги вимірювальної інформації при навчанні системи діагностування;

- отримали розвиток теорія і методи контролю змін стану динамічних систем на базі статистик накопичених сум, що дозволило отримати додаткову діагностичну інформацію про зміни залишкової дисперсії вейвлет-коефіцієнтів при їх локальних регресійних перетвореннях;

- отримали розвиток теорія і методи бездемонтажного контролю метрологічних характеристик віброперетворювачів, що дозволило виявити зміни всіх

складових їх систематичних і випадкових похибок, які зумовлені процесами експлуатаційного старіння перетворювачів;

- отримали розвиток теорія і методи структурної і параметричної ідентифікації просторово орієнтованих систем віброперетворювачів у розподілених інформаційних вимірювальних системах вібродіагностики, що дозволило розробити методики оцінювання рівня дестабілізуючих факторів.

Практичне значення одержаних результатів для приладобудування полягає в наступному:

- розроблені та впроваджені апаратурні, алгоритмічні та програмні засоби, які забезпечили виконання заходів з доведення систем контролю та діагностування паливних систем двигунів типу Д80 на ДП «Завод ім. Малишева». Завдяки використанню розробленого пристрою контролю та діагностики параметрів паливоподачі і програмного забезпечення для обробки отриманих сигналів суттєво скоротились матеріальні затрати при регламентних ремонтних роботах;

- розроблені та апробовані п'єзоелектричні вимірювальні перетворювачі та статистичні методи обробки їх сигналів при дослідженнях вібраційних стаціонарних і спектрально-нестационарних процесів, що відображають верифіковані стани дизельних двигунів танків Т64, Т72 на ДП «Харківський бронетанковий завод». Аналіз впровадження нових процедур вібродіагностики засвідчив підвищення на 5-7 % вірогідності рішень щодо прихованих дефектів дизельних двигунів;

- випробувані та впроваджені методики оптимізації розмірності простору інформативних критеріальних статистик прийняття діагностичних рішень, на основі коваріаційного аналізу коефіцієнтів неперервних вейвлет-перетворень вібросигналів в УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, що збільшило на 7-12 % вірогідність функціональної діагностики механічних вузлів сільськогосподарської техніки при її сертифікаційних випробуваннях;

- використано при сертифікаційних випробуваннях п'єзоелектричний первинний перетворювач вібрації (захищений патентом України №89000, МПК G01H 1/16 / Щапов П.Ф., Мигущенко Р.П. Бойко В.В., Замятін П.М по заявці № u 2013 12273, опубл. 10.04.2014, бюл. №7/2014.) в Державній установі «Інститут загальної та невідкладної хірургії ім. В.Т. Зайцева НАМН України» і доведена його ефективність в отриманні діагностичної інформації за рахунок виділення низькочастотної складової локалізованого спектру вібросигналів;

- доведена ефективність одно- і двопараметрових інформативних критеріальних кумулятивних статистик при контролі та діагностиці функціонального стану вібраційних вузлів промислових об'єктів за множинами інформативних параметрів вейвлет-зображення при діагностиці стану тракторно-автомобільного парку (автомобілі ГАЗ, ГАЗель, КамАЗ, Славута), що зменшило на 6-9 %, з довірчою ймовірністю 0.95, ризик контролю другого роду;

- за результатами дисертаційної роботи здійснене впровадження в навчальний процес кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХП» стенду відладки мікропроцесорних пристроїв для постановки фронталь-

них лабораторних робіт з курсу «Основи мікропроцесорної техніки» для студентів напряму підготовки 6.051001 – Метрологія та інформаційно-вимірвальні технології.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати отримано здобувачем самостійно, що підтверджується публікаціями з ключових аспектів проблеми. Серед них: здійснений аналіз джерел інформаційної невизначеності вимірвальних сигналів у сучасних системах технічного контролю та діагностування вібраційних об'єктів; прокласифіковані джерела невизначеності рішень і їх вплив на елементи алгоритму діагностування; синтезована інформаційна модель процедури альтернативної функціональної діагностики; досліджені характеристики лінійної вирішувальної функції з незалежними інформативними ознаками; здійснений синтез та дослідження двовимірних діагностичних параметрів при коваріаційному аналізі тривимірних вейвлет-перетворень вібраційних вимірально-інформаційних сигналів; проведені експериментальні дослідження при оптимізації систем вібродіагностики за критерієм середнього ризику; розроблені математичні моделі ідентифікації дефектів в об'єктах вібродіагностики; здійснені впровадження інженерних розробок дисертаційної роботи на провідних промислових підприємствах Харкова.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Результати досліджень доповідались і були схвалені на: XI, XII, XIII, XVI, XIX, XX, XXI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2003, 2004, 2005, 2008, 2011, 2012 і 2013 рр.); Міжнародній конференції «Проблеми інформатики та моделювання» (Харків, 2003 р.); науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми автоматики і приладобудування» (Харків, 2012 р.); 70-й науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету (Київ, 2014 р.); 24 Національному науковому симпозіумі з міжнародною участю «Метрологія і метрологічне забезпечення» (Созопол, Болгарія, 2014 р.); на семінарах кафедри інформаційно-вимірвальних технологій і систем НТУ «ХП».

Публікації. Основні наукові і практичні результати досліджень опубліковані в 34 роботах, серед яких: 1 – монографія (без співавторів), 21 стаття у наукових фахових виданнях України (2 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 5 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 2 патенти України, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 475 сторінок, з них: 66 рисунків по тексту; 18 рисунків на 11 окремих сторінках; 33 таблиці по тексту; 2 таблиці на 2 сторінках; список використаних джерел з 240 найменувань на 24 сторінках; 11 додатків на 154 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено характеристики наукової новизни та практичного значення отриманих результатів і їх впровадження.

Перший розділ роботи присвячений аналізу проблеми підвищення вірогідності контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів в умовах інформаційної невизначеності вимірювальних сигналів та вибору напрямів наукових досліджень.

Проаналізовані основні джерела інформаційної невизначеності вимірювальних сигналів у сучасних системах технічного контролю та діагностування промислових об'єктів, включаючи аналіз джерел невизначеності як первинних вимірювальних сигналів, так і діагностичних рішень при контролі функціонального стану складних вібраційних об'єктів. Базис інформаційних сигналів вібраційних об'єктів показав, що до об'єктів діагностування можна віднести практично будь-який промисловий об'єкт або технологічні процеси, які він використовує; біологічні об'єкти та процеси їх біохімічних змін; екологічні процеси, що визначають рівень технологічності використовуваного обладнання; соціальні процеси, які характеризуються певними трендами розвитку суспільства на фоні поточної невизначеності впливових соціальних факторів тощо. Діагностика поточного стану будь-якого об'єкту чи процесу є важливим чинником, за допомогою якого можливо визначити основні технічні та функціональні параметри об'єкту чи процесу, попередити розвиток дефектів і скорочення затрат на їх відновлення, визначити оптимальні технології при експлуатації діагностованого об'єкту, оцінити залишковий ресурс.

Огляд сучасного стану діагностуючого обладнання вітчизняних і закордонних виробників показав, що задачу розробки методів підвищення вірогідності діагностики об'єктів зі стохастичними параметрами повністю не вирішено, особливо коли неможливе відтворення еталонних об'єктів або фізично реалізованих моделей контрольованих величин. Зроблено висновок, що використання існуючих методів підвищення вірогідності без використання підходів ймовірно-статистичного аналізу створює проблему втрати інформації на етапі навчання системи контролю та діагностування і виникнення неусувної методичної складової ймовірності помилкових рішень при функціонуванні.

Існуючі, в даний час, теоретичні підходи до створення методів підвищення вірогідності контролю і діагностики об'єктів з випадковими параметрами можна розділити на три, практично непересічні, групи.

По-перше, це теоретичні розробки в області метрологічного забезпечення контролю при технічних вимірюваннях параметрів промислової продукції. На базі цієї теорії створені тестові і структурно-алгоритмічні методи підвищення вірогідності багатопараметрового контролю, що дозволяють коректувати границі допускових інтервалів за рахунок статистично обґрунтованих адаптивних процедур підвищення точності вимірювань, коли невизначеність в оцінках кон-

трольованих параметрів метрологічно нормована, а самі параметри представлені моделями статичних вимірювальних величин. В розвиток цих методів великий вклад внесли такі вчені як Е.М. Бромберг, Є.Т. Володарський, В.О. Поджаренко, В.В. Кухарчук, Ю.М. Туз, В.Б. Большаков, П.П. Орнатський, Ю.В. Куц, Ю.О. Скрипник, С.І. Кондрашов, С.Б. Данилевич.

По-друге, це статистична теорія інформаційних перетворювань в задачах прийняття рішень, класифікації і розпізнавання по багатомірним кінцевим реалізаціям стаціонарних випадкових сигналів, коли вимірювальні параметри представлені моделями динамічних величин, що задають порушення стаціонарності станів об'єкта діагностики і контролю. В розробку методів підвищення вірогідності контролю і діагностики, на базі цієї теорії, великий вклад внесли такі вчені як А. Банвеніст, В.П. Малайчук, А.В. Мозговий, В.Ю. Кучерук, М.П. Цапенко, М. Бассвіль, Б.Р. Левін.

Третя група методів зосереджена, в основному, на підвищенні технічної складності засобів вимірювального контролю на базі теоретично обґрунтованих математичних моделей непрямих фізичних перетворень неелектричних одиничних і комплексних величин в електричні сигнали. Ці методи направлені на підвищення обсягу первинної інформації за рахунок розширення номенклатури контрольованих величин з урахуванням детермінованих, фізично обґрунтованих зв'язків між вхідними і вихідними величинами датчиків і первинних перетворювачів в системах багатопараметрового контролю. Основний науковий вклад в розробку подібних методів і пристроїв багатопараметрового контролю і діагностики внесли вчені В.В. Ключев, В.П. Себко, В.В. Мірошников, П.Г. Столярчук, Ю.К. Тараненко.

Аналіз джерел діагностичних рішень при контролі технічного стану функціонально-складних об'єктів показав проблему невизначеності характеристик вимірювально-інформаційних сигналів, структурних властивостей функціонування діагностичних систем, алгоритмічних властивостей функціонування діагностичних систем.

Для аналізу джерел невизначеності діагностичних рішень використаний узагальнений алгоритм технічного діагностування, який представлений удосконаленою графічною моделлю на рис. 1.

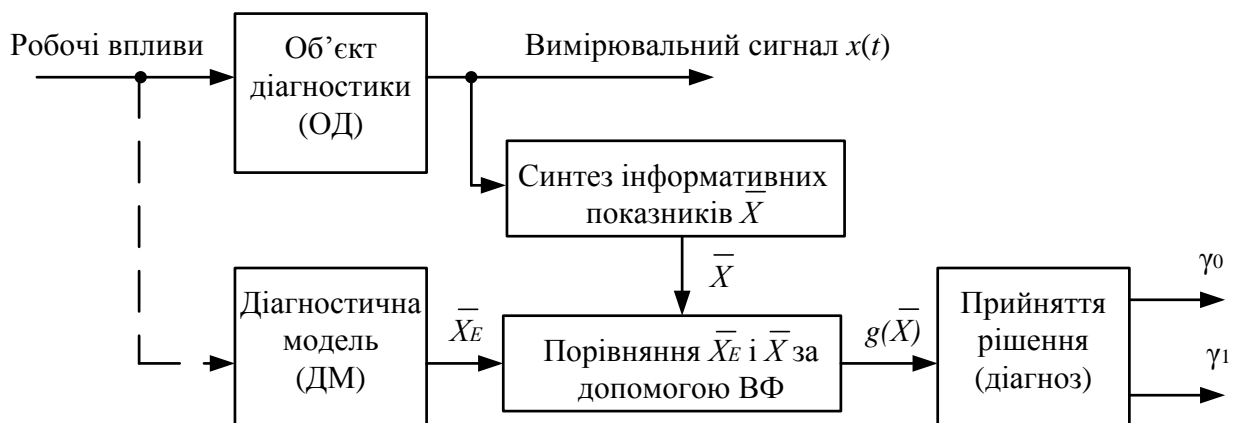


Рисунок 1 – Узагальнений алгоритм технічного діагностування

Правило вибору рішення γ_0 чи γ_1 , що відповідають висновкам «технічний стан в нормі» чи «технічний стан не в нормі» здійснюється у відповідності з перетворенням виду

$$g(\bar{X}) \begin{matrix} \gamma_0 \\ > \\ < \\ \gamma_1 \end{matrix} 0,$$

$$\text{де } g(\bar{X}) = g_j(\bar{X} / \{a_{10}, \dots, a_{M0}\}, \{a_{11}, \dots, a_{M1}\}). \quad (1)$$

Вираз (1) для вирішувальної функції $g(\bar{X})$ формально повинний містити у своїй правій частині інформацію не тільки про параметри

$$\{a_{1j}, \dots, a_{Mj}\}_0^{\parallel}, \quad (2)$$

але і про вид ймовірнісної моделі:

$$f(\bar{X} / S_j), \quad j = \overline{0, 1} \quad (3)$$

умовного (для кожного зі станів об'єкта діагностування: S_0 – працездатний і S_1 – з функціональними порушеннями) закону розподілення випадкового вектора вхідних сигналів \bar{X} .

В загальному випадку, коли можливі порушення адекватності, вираз (1) приймає вигляд

$$g(\bar{X}) = g_j\left(\bar{X} / \{\hat{f}(\bar{X} / S_j)\}_0^{\parallel}, \{\hat{a}_{1j}, \dots, \hat{a}_{Mj}\}_0^{\parallel}\right), \quad (4)$$

де $\{\hat{f}(\bar{X} / S_j)\}_0^{\parallel}$ – оцінки умовних щільностей ймовірнісної моделі (3); $\{\hat{a}_{1j}, \dots, \hat{a}_{Mj}\}_0^{\parallel}$ – оцінки умовних невідомих параметрів (2).

Алгоритм, який представлений на рис. 1, використовує математичне виводове поняття діагностичної моделі (ДМ), яке в залежності від виду робочого впливу і технічного стану об'єкту діагностування (ОД), формує вектор \bar{X}_E . Вимірювальний сигнал $x(t)$ розглядається як реалізація вихідного вібросигналу, за яким відновлюється (синтезується за допомогою відповідної інформаційно-вимірювальної технології) вектор інформативних параметрів \bar{X} . Діагноз здійснюють, приймаючи рішення (γ_0 або γ_1) у відповідності з логічною моделлю (1), в якій вирішувальна функція (ВФ) $g(\bar{X})$ визначається її оцінкою (4).

У розділі проведений аналіз тестових і структурно-алгоритмічних методів адаптивної корекції допускових інтервалів для вимірювальних параметрів технічного контролю; інформаційних технологій синтезу процедур прийняття рішень; класифікації функціональних порушень технічного стану та виявлення змін контрольованих випадкових процесів з урахуванням реального часу; здійснений огляд, класифікація і аналіз характеристик засобів, які реалізують процес діагностування за вимірювальними вібросигналами.

Результати проведеного аналізу дозволили обрати базові напрями теоретичних і практичних досліджень:

- розробка інформаційно-діагностичних моделей прийняття рішень в умовах обмеженості апріорної вимірювальної інформації;
- синтез простору діагностичних параметрів, які враховують потенційну інформаційну надмірність локально спектрально-нестационарних вібраційних вимірювальних сигналів;
- розробка методів статистичної оптимізації простору діагностичних параметрів з урахуванням локальних спектральних змін;
- розробка методів створення часової надмірності для числових характеристик оцінок інформативних параметрів у вигляді синтезованих кумулятивних тестових статистик;
- розробка пристроїв вібраційної діагностики (спеціалізованих вимірювальних віброперетворювачів, електронних блоків, інтерфейсів та діагностичних систем з оригінальним алгоритмічним і програмним забезпеченням).

Другий розділ присвячено дослідженню інформаційних і ймовірнісних властивостей показників ефективності параметричних процедур вібродіагностики.

У будь-яких інформаційно-вимірювальних системах контролю, діагностики та ідентифікації, які здійснюють перетворення первинної вимірювальної багатомірної інформації в інформацію вторинну одномірну, що представлена логічними рішеннями, ефективність останніх залежить від ступеню адекватності математичних моделей інформаційних перетворень змінам фізичних властивостей об'єкта вібродіагностики. Ступінь такої адекватності залежить від коректності виконання наступних умов планування діагностичного експерименту:

- забезпечення заданої точності оцінювання коефіцієнтів математичної моделі інформаційно-логічного перетворення результатів первинних вимірювань у вторинні статистичні рішення;
- вибір найбільш інформативних складових вектора вхідних вимірювальних сигналів ІВС контролю і діагностування;
- вибір показників ефективності роботи ІВС, які враховують апріорну невизначеність оцінок коефіцієнтів математичної моделі перетворення, оптимальних, по максимуму отримуваної діагностичної інформації;
- вибір розмірності вектора вхідних сигналів та обсяги вимірювань у реальних умовах експлуатації ІВС.

Якщо стан об'єкту діагностування характеризується як S_0 – працездатний (умовна щільність розподілення ймовірності – $f(x_i|S_0)$), або як $\{S_j\}_1^K$ – з функціональними порушеннями (умовна щільність розподілення ймовірності – $f(x_i|S_j)$, $j = \overline{1, K}$), то вибір рішення γ_r (вектор \bar{X} відноситься до стану S_r) здійснюється за правилом:

$$q_r \cdot f(\bar{X}|S_r) > \max \{q_j \cdot f(\bar{X}|S_j)\}, j = \overline{0, (K+1)}, r \neq j.$$

де q_0, q_1, \dots, q_K – апріорні ймовірності станів S_0, S_1, \dots, S_K ; $\bar{X} = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор вхідних сигналів.

Вирішувальна функція для двоальтернативної діагностики

$$g(\bar{X}) = \ln \Lambda \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \end{matrix},$$

де
$$\Lambda = \frac{q_0 \cdot f(\bar{X}|S_0)}{q_1 \cdot f(\bar{X}|S_1)} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \end{matrix} 1.$$

Класифікація видів нормативних параметричних вирішувальних функцій дозволила обрати в якості базової лінійну, з незалежними інформативними ознаками

$$[\bar{X} - 0.5(\mu_{(0)} + \mu_{(1)})] D^{-1}(\mu_{(0)} - \mu_{(1)}), \quad (5)$$

де $\mu_{(0)}, \mu_{(1)}$ – вектори середніх; $D_{(0)}, D_{(1)}$ – дисперсійні матриці.

Скалярний вигляд лінійної вирішувальної функції з незалежними інформативними ознаками (5) має вигляд

$$g(x) = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i^{(0)} - m_i^{(1)})}{\sigma_i^2} \left[x_i - \frac{(m_i^{(0)} + m_i^{(1)})}{2} \right], \quad (6)$$

де $m_i^{(0)}, m_i^{(1)}, \sigma_i^2$ – відповідно оцінки умовних середніх та дисперсії для i -тої складової $x_i, i = \overline{1, n}$;

Вірогідність діагностики визначається як

$$P_D = 1 - \alpha q_0 - \beta q_1.$$

При однакових ризиках діагностики ($\alpha = \beta$) вірогідність діагностики

$$P_D = \Phi\left(\frac{\delta}{\sqrt{2}}\right),$$

де $\Phi\left(\frac{\delta}{\sqrt{2}}\right)$ – інтеграл ймовірності;

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i^{(0)} - m_i^{(1)}}{\sigma_i} \right)^2} \quad \text{– геометрична відстань у просторі інформативних}$$

ознак.

На базі обраної вирішувальної функції (6) синтезована модель кількості діагностичної інформації. Вираз для кількості очікуваної діагностичної інформації I знаходиться, як різниця між вихідною H_ξ і залишковою $H_{\Delta\xi}$ ентропією

$$I = H_\xi - H_{\Delta\xi}.$$

Для нормальних законів розподілення щільності $f(\xi)$ і сумісної щільності $f(\xi, \Delta\xi)$ отримані наступні загальні вирази для ентропій H_ξ і $H_{\Delta\xi}$ та кількості інформації:

$$H_\xi = - \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \log_2 f(\xi) dx - \log(\Delta g) = \log_2 \left\{ \frac{\sigma_\xi \sqrt{2\pi e}}{\Delta g} \right\};$$

$$H_{\Delta\xi} = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \Delta\xi) \log_2 \frac{f(\xi, \Delta\xi) \cdot \Delta g}{f(\Delta\xi)} d\xi d(\Delta\xi) = \log_2 \left\{ \frac{\sigma_{\xi} \sigma_{\Delta\xi} \sqrt{2\pi e}}{\Delta g \sqrt{\sigma_{\xi}^2 + \sigma_{\Delta\xi}^2}} \right\};$$

$$I = \frac{1}{2} \log_2 \left[1 + \frac{\sigma_{\xi}^2}{\sigma_{\Delta\xi}^2} \right],$$

де Δg – похибка визначення значення вирішувальної функції (6); ξ – вирішувальна функція $g(X)$, яка приймає значення $\Delta\xi$ після прийняття рішень γ_0 або γ_1 .

Модель кількості діагностичної інформації визначається як

$$I = \frac{1}{2} \log_2 \left\{ 1 + \frac{(q_0 q_1 + \delta^{-2})}{[\alpha(1-\alpha)q_0 + \beta(1-\beta)q_1]} \right\} \quad (7)$$

з дисперсіями до і після прийняття рішення γ_0 або γ_1 :

$$\sigma_{\xi}^2 = \delta^2 + \delta^4 q_0 q_1; \quad \sigma_{\Delta\xi}^2 = \delta^4 [\alpha(1-\alpha)q_0 + \beta(1-\beta)q_1].$$

Модель (7) досліджена відносно впливу систематичних похибок вимірювання на ризики функціональної діагностики, впливу випадкових похибок оцінювання коефіцієнтів вирішувальної функції на кількість діагностичної інформації, впливу обмеженості апіорної інформації на вигляд і величину вірогідності діагностики. Доведено, що при проведенні діагностичних процедур можлива компенсація зміщень коефіцієнтів лінійного перетворення за рахунок перерозподілу адитивних і мультиплікативних похибок вимірювального перетворення. На базі ймовірнісної моделі вирішувальної функції (6) встановлена нижня межа N_{\min} для обсягу N навчальних вибірок $N_{\min} > 2^{(2M-1)}$, та верхня межа n_{\max} для допустимого числа n складових вектора \bar{X}

$$n_{\max} \leq \frac{[1 - 2^{2M} (2N)^{-1}]}{\bar{\delta}^2 \{2^{2M} [\alpha(1-\alpha)q_0 + \beta(1-\beta)q_1] - q_0 q_1\}}.$$

Результати досліджень дозволили теоретично обґрунтувати планування вимірювань в межах діагностичного експерименту та в умовах інформаційної обмеженості, що дозволило:

- розробити математичну модель для розрахунку діагностичної інформації як функції параметрів плану вимірювально-діагностичного експерименту;
- отримати математичні моделі зміщення границь допускового інтервалу для вибраної лінійної вирішувальної діагностичної функції з урахуванням адитивних і мультиплікативних похибок первинних вимірювань;
- довести існування оптимальної розмірності простору інформативних параметрів, що відповідає максимуму кількості діагностичної інформації при обмеженнях на обсяг вимірювальної інформації;
- запропонувати нову класифікацію видів вірогідності функціональної діагностики, яка враховує обмеженість вимірювальної інформації на етапі навчання систем функціонального діагностування.

Третій розділ присвячений синтезу інформативних діагностичних параметрів первинних вимірювальних вібросигналів, в умовах обмеженості часу спостереження, з застосуванням процедур локалізованого спектрального аналізу (вейвлет-аналізу).

При дискретизованому неперервному вейвлет-перетворенні послідовності $\{x_k\}_1^N$ результатів вимірювання випадкового вібросигналу $X(t)$ використовувалась математична залежність

$$W_{g_n}(a_i, b_j) = \frac{a_i}{\sqrt{C_{g_n}|a_i|}} \sum_{k=1}^N x_k \left[g_{n-1}\left(\frac{t_{k-1} - b_j}{a_i}\right) - g_{n-1}\left(\frac{t_k - b_j}{a_i}\right) \right], \quad (8)$$

де $W_{g_n}(a_i, b_j)$ – вейвлет-коефіцієнти, які вираховані за допомогою гаусівського вейвлету n -го порядку; $g_{n-1}(t)$ – гаусівський материнський вейвлет $(n-1)$ -го порядку; C_{g_n} – нормувальний множник; x_k – відліки реалізації $X(t)$ в моменти часу t_k , $k = \overline{1, N}$; a_i , b_j – параметри масштабу та зсуву вейвлет-зображення відповідно.

На рис. 2 і рис. 3 наведені типові вібросигнали тепловозного двигуна (зі станами S_0 і S_1) з трубки паливного насосу високого тиску і їх відповідні вейвлет-зображення на основі (8).

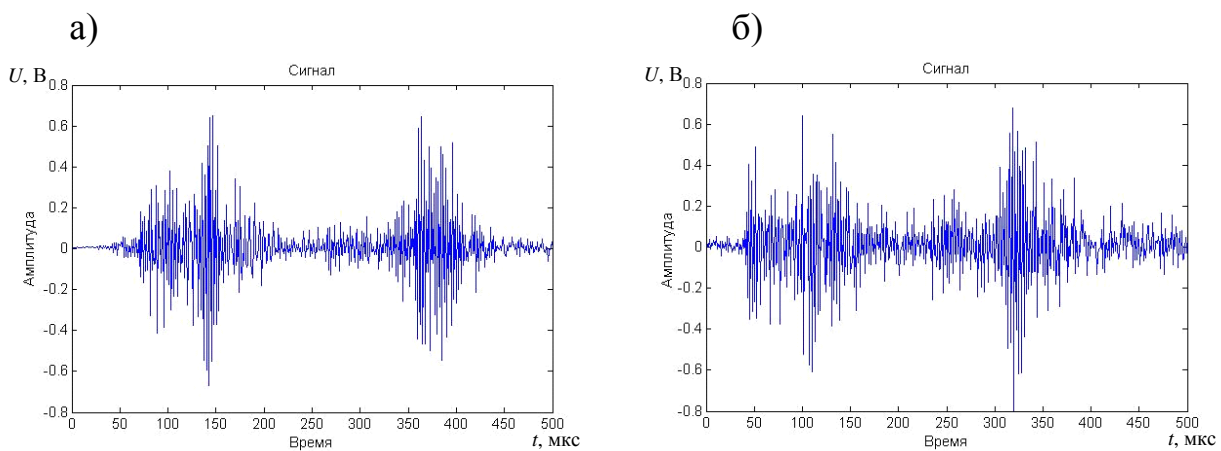


Рисунок 2 – Вібросигнали, які відповідають працездатному (а) і несправному (б) стану форсунки дизельних двигунів

Оскільки тривимірні вейвлет-зображення містять надмірну інформацію щодо локальних змін математичного сподівання вейвлет-коефіцієнтів по осям масштабу a та зсуву b , запропоновано оцінити такі зміни послідовностями частинних регресій, окремо по вказаним осям. Надмірна додаткова інформація, що міститься в співвідношеннях між функціональними змінами математичного сподівання та випадковими відхиленнями від нього вейвлет-коефіцієнтів (8), одержана методами дисперсійного аналізу частинних регресій у вигляді тестових F -статистик. Перетворення великої множини вейвлет-коефіцієнтів (8) у ві-

дносно невелику множину F -статистик еквівалентна операції стиснення інформації.

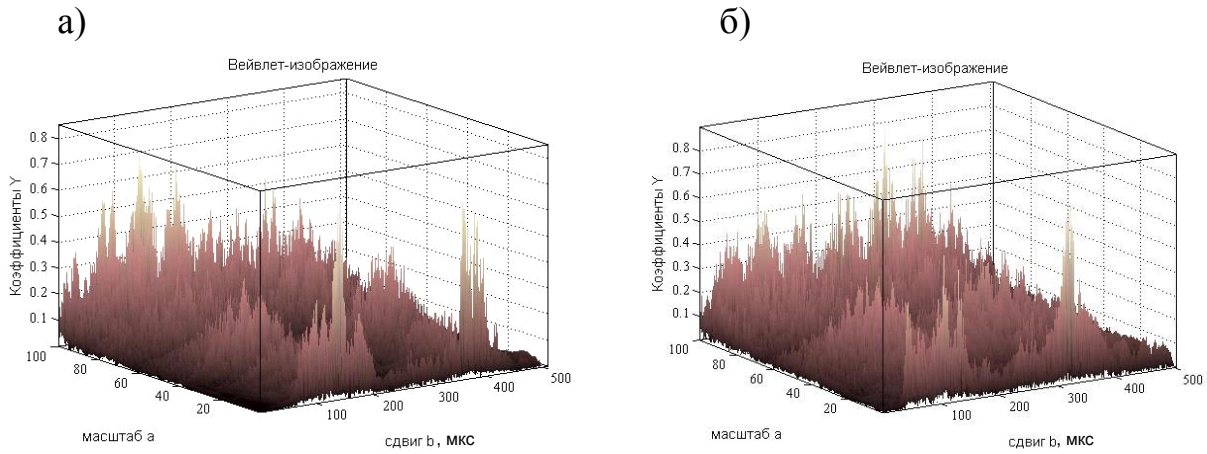


Рисунок 3 – Вейвлет-зображення, які відповідають працездатному (а) і несправному (б) стану форсунок дизельних двигунів

У дисертаційній роботі здійснена заміна тривимірної моделі вейвлет-зображення множинами двовимірних моделей:

$$\{V_{jl} = F_a[a_j | b_l = const] + \delta_{jl}\}_{l=1}^L; \quad \{V_{jl} = F_b[b_l | a_j = const] + \varepsilon_{jl}\}_{j=1}^J,$$

де F_a і F_b – не випадкові функції (тренди); δ_{jl} і ε_{jl} – випадкові величини (випадкові залишки).

Функції F_a і F_b оцінюються, представивши їх послідовностями лінійних регресій з випадковими коефіцієнтами. Загальний вигляд двовимірної моделі у формі кусочно-лінійної послідовності k -груп двовимірних спостережень

$$v_{si} = A_s + B_s z_{si} + \Delta_{si},$$

де s – номер групи спостережень, $s = \overline{1, K}$; i – номер спостереження в s -тій групі; $i = \overline{1, n_s}$; n_s – число спостережень в s -тій групі; Δ_{si} – випадковий залишок.

Дисперсійне розкладання загальної суми квадратів відхилень v_{si}

$$Q = \sum_{s=1}^K \sum_{i=1}^{n_s} (v_{si} - \bar{V})^2$$

від загального середнього \bar{V} включає п'ять складових

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_\Delta,$$

з яких Q_Δ – залишкова сума, яка відповідає за неусувний випадковий шум тривимірного вейвлет-зображення. За локальні внутрішньо групові геометричні особливості зображення відповідають суми Q_1 , Q_2 (частинні адитивні зміщення) і Q_3 (мультиплікативні зміни). Сума Q_0 характеризує загальну лінійну зміну середніх значень v_{si} .

F -статистики визначаються дисперсійними відношеннями:

$$F_0 = \frac{Q_0}{Q_\Delta}(N-2k); \quad F_1 = \frac{Q_1}{Q_\Delta}(N-2k); \quad F_2 = \frac{Q_2}{Q_\Delta}\left(\frac{N-2k}{k-2}\right); \quad F_3 = \frac{Q_3}{Q_\Delta}\left(\frac{N-2k}{k-1}\right).$$

Якщо $F_j^{(0)}$ і $F_j^{(1)}$ інформативні F -статистики, які характеризують стани S_0 і S_1 , то статистична відстань між цими станами буде визначатись виразом

$$d = \sum_{j=1}^L \frac{(F_j^{*(0)} - F_j^{*(1)})^2}{\left(\sigma_{F_j^{*(0)}}^2 + \sigma_{F_j^{*(1)}}^2\right)}. \quad (9)$$

Нижня границя квадрата геометричної відстані d між станами S_0 і S_1

$$d^* = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L \frac{(F_j^{*(0)} - F_j^{*(1)})^2}{(F_j^{*(0)} + F_j^{*(1)})}.$$

При апроксимації χ^2 -розподілення для відстані d^* нормальним законом:

$$m_d = L + d^*, \quad \sigma_d = \sqrt{2(L + 2d^*)},$$

кінцевий вираз для цільової функції має вигляд

$$\beta = 1 - \Phi\left(\frac{L + d^* - \chi_{L,\alpha}^2}{\sqrt{2(L + 2d^*)}}\right),$$

де $\chi_{L,\alpha}^2$ – $(\alpha \cdot 100)\%$ -на точка χ^2 -розподілення з L степенями свободи.

Результати математичного моделювання процедури параметричної функціональної діагностики показали ефективність оцінювання, за геометричною відстанню між діагностованими станами, інформативності F -статистик вейвлет-перетворених віброцигналів та дозволили розробити методику формування оптимальної розмірності простору F -статистик, що забезпечує мінімум ймовірності помилки діагностики другого роду або максимум потужності правила прийняття рішення.

Результати досліджень даного розділу дозволили:

- довести можливість зменшення розмірності вейвлет-зображень для обмежених у часі віброцигналів і одержання за рахунок такого зменшення чотирьох F -статистик дисперсійних відношень, що несуть додаткову інформацію відносно змін функціонального стану;

- отримані F -статистики, будучи випадковими величинами з відомим законом розподілу, дозволяють оцінити ймовірності помилок діагностики першого та другого роду;

- отримана математична модель оцінки вірогідності діагностики, як цільової функції, для потенційної оптимізації простору інформативних параметрів.

У четвертому розділі наведено результати досліджень по статистичній оптимізації моделі вібродіагностики за мінімумом середнього ризику.

Проаналізований простір інформативних параметрів, складений з:

- підмножини F -статистик;

- підмножини дисперсій $D_{W_1}, D_{W_2}, \dots, D_{W_K}$.

Для F -статистик:

$$F_{0k} = \frac{F_k^2}{(1 - F_k^2)} (H - 2), \quad k = \overline{1, K}.$$

Для дисперсій:

$$D_{W_k} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H W_{kh}^2 - \left(\frac{1}{H} \sum_{h=1}^H W_{kh} \right)^2, \quad k = \overline{1, K}.$$

Математична модель процедури діагностики має вигляд

$$\frac{\prod_{h=1}^H [f(F_{0h}|S_0) \cdot f(D_{W_h}|S_0)] \cdot \prod_{k=1}^K [f(F_{0k}|S_0) \cdot f(D_{W_k}|S_0)]^{\gamma_0}}{\prod_{h=1}^H [f(F_{0h}|S_1) \cdot f(D_{W_h}|S_1)] \cdot \prod_{k=1}^K [f(F_{0k}|S_1) \cdot f(D_{W_k}|S_1)]^{\gamma_1}} > 1. \quad (10)$$

Логарифмуючи ліву і праву частини нерівності (10), отримане співвідношення:

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^H [\ln(F_{0h}|S_0) + \ln(D_{W_h}|S_0)] + \sum_{k=1}^K [\ln(F_{0k}|S_0) + \ln(D_{W_k}|S_0)] & \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \end{matrix} \\ > \sum_{h=1}^H [\ln(F_{0h}|S_1) + \ln(D_{W_h}|S_1)] + \sum_{k=1}^K [\ln(F_{0k}|S_1) + \ln(D_{W_k}|S_1)]. \end{aligned} \quad (11)$$

Якщо у виразах (10) і (11) значення H досить великі ($H > 30$), то щільності розподілу статистик $F_{0k}, D_{W_k}, F_{0h}, D_{W_h}$ спрямовуються, за ймовірністю, до нормальних законів розподілення. У цьому випадку суми лівої і правої частин нерівності (11) будуть квадратичними формами від нормальних випадкових величин, нормування яких за дисперсією для $\{F_{0k}\}_1^K, \{D_{W_k}\}_1^K, \{F_{0h}\}_1^H$ і $\{D_{W_h}\}_1^H$ перетворює щільності законів розподілення для лівої і правої частин, відповідно, в центральне χ_L^2 і нецентральне $\chi_{L,\lambda}'^2$ розподілення з λ – параметром нецентральності.

Середній ризик при одиничній матриці втрат, для визначеного випадку, виражається залежністю

$$\bar{R} = q_0 \int_{\chi_{кр}^2}^{\infty} f(\chi^2) d\chi^2 + q_1 \int_0^{\chi_{кр}^2} f(\chi'^2) d\chi'^2,$$

де χ^2 – випадкова величина, що має центральне χ^2 -розподілення; χ'^2 – випадкова величина, що має нецентральне χ^2 -розподілення з L – числом степеней свободи і λ – параметром нецентральності.

Мінімум середнього ризику \bar{R} визначається як корінь рівняння відносно $\chi_{кр}^2$

$$q_0 \frac{\chi_{кр}^{\frac{L}{2}-1} \cdot e^{-\frac{\chi_{кр}}{2}}}{2^{\frac{L}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{L}{2}\right)} - q_1 \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{\chi_{кр}^{\left(\frac{L+2i}{2}-1\right)} \cdot e^{-\frac{\chi_{кр}}{2}}}{2^{\left(\frac{L+2i}{2}\right)} \cdot \Gamma\left(\frac{L+2i}{2}\right)} \right] \cdot \frac{\left(\frac{\lambda}{2}\right)^i}{i!} \cdot e^{-\frac{\lambda}{2}} = 0.$$

За результатами досліджень розроблений і апробований алгоритм обробки результатів вимірювань віброцигалів:

1. Здійснення вейвлет-перетворення віброцигалу (8).

2. Обчислення підмножин дисперсій вейвлет-коефіцієнтів $\{D_{W_k}\}_1^H$, $\{D_{W_h}\}_1^K$ і підмножин F -статистик $\{F_{0k}\}_1^H$, $\{F_{0h}\}_1^K$.

3. Визначення середнього ризику \bar{R} .

4. Ранжирування k -тих і h -тих складових векторів інформативних параметрів за спаданням їх середнього ризику \bar{R} .

5. Послідовне формування, з наростанням розмірності, простору інформативних складових векторів F_{0k} , F_{0h} , D_{W_k} , D_{W_h} .

7. Модель діагностування на підставі (9)

$$d^* = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^L \left(F_j^{*(0)} - F_j^{*(1)} \right)^2}{\sum_{j=1}^L \left(F_j^{*(0)} + F_j^{*(1)} \right)} + \frac{\sum_{j=1}^L \left(D_j^{*(0)} - D_j^{*(1)} \right)^2}{\sum_{j=1}^L \left(D_j^{*(0)} + D_j^{*(1)} \right)} \right\}.$$

8. Приймання рішення γ_0 (для стану S_0) і γ_1 (для стану S_1):

$$\gamma_0 : d^* < \chi_{кр}^2;$$

$$\gamma_1 : d^* \geq \chi_{кр}^2.$$

При цьому гарантується мінімальне значення середнього ризику \bar{R}_Σ , що доведено шляхом імітаційного моделювання.

Графічна ілюстрація процедури пошуку оптимальної розмірності простору інформативних параметрів наведена на рис. 4.

Результати досліджень даного розділу дозволили:

- довести, що використання критерію мінімуму середнього ризику дозволяє не тільки максимізувати вірогідність вібродіагностики, але і вибрати статистично значущі значення параметрів a і b в моделі вейвлет-перетворення;

- розробити метод двоетапної структурно-алгоритмічної оптимізації, по максимуму вірогідності, що забезпечує максимізацію потужності правила прийняття рішення щодо функціонального стану об'єкта вібродіагностики;

- розробити програмне забезпечення системи формування інформативних F -статистик та виконання діагностичних процедур визначення стану вібраційних об'єктів.

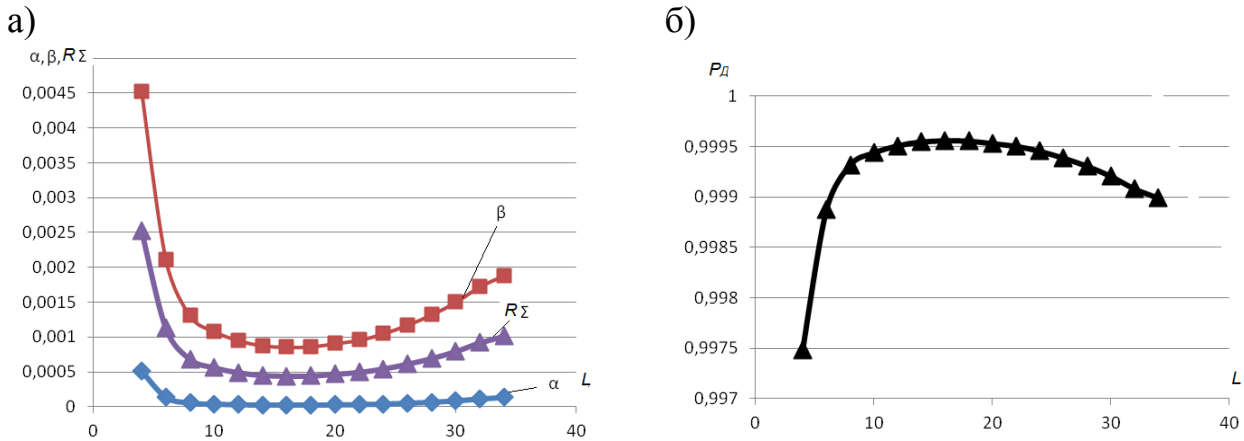


Рисунок 4 – Графічна ілюстрація наявності оптимального значення розмірності простору інформативних параметрів:

- а) цільова функція – ризики діагностики $\alpha, \beta, \bar{R}_{\Sigma}$;
 б) цільова функція – вірогідність діагностики.

У п'ятому розділі розглянуто задачі використання кумулятивних тестових статистик при контролі змін залишкової дисперсії вейвлет-коефіцієнтів для вибору значень масштабу та зсуву при формуванні інформативних F -статистик. Окрім того, наведено рішення задачі використання кумулятивних статистик в задачах діагностики стану вібраційних об'єктів при стрибкоподібних змінах спектральної потужності контрольованих сигналів.

Запропоновано використання двох типів кумулятивних статистик, які несуть інформацію про спектральні (Q -статистики) та потужнісні (T -статистики) локальні зміни сигналів.

Тестові Q -статистики відзначаються фізичним змістом – оцінка кількості перетинів досліджуваної функції нульового рівня. Зміни знака реалізацій центрованого процесу $X(t)$ визначаються параметром q . Статистичні моменти ймовірності q визначаються як:

$$\begin{cases} m_q = q; \\ D_q = \sqrt{\frac{q(1-q)}{n_2}}. \end{cases}$$

Тоді статистика виявлення зміни частоти перетину нульового рівня

$$Q = \frac{q - m_q}{\sqrt{D_q}}. \quad (12)$$

При різних станах діагностованого об'єкту моменти першого і другого порядку приймають вигляд:

$$\begin{cases} m_Q^{(0)} = 0; \\ D_Q^{(0)} = 1. \end{cases} \quad \text{– для стану } S_0; \quad \begin{cases} m_Q^{(1)} = \frac{q_1 - 0.5}{0.5} \sqrt{n_2}; \\ D_Q^{(1)} = 4q_1(1 - q_1). \end{cases} \quad \text{– для стану } S_1.$$

Ймовірності помилок першого α і другого β роду визначаються за виразами:

$$\begin{cases} \alpha = 1 - 2\Phi_0\left(U_{\alpha/2}\right); \\ \beta = \Phi_0\left(\frac{U_{\alpha/2} - m_Q^{(1)}}{\sqrt{D_Q^{(1)}}}\right) - \Phi_0\left(\frac{-U_{\alpha/2} - m_Q^{(1)}}{\sqrt{D_Q^{(1)}}}\right), \end{cases}$$

де $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$ – функція Лапласа; $U_{\alpha/2}$ – процентна точка нормованого розподілення для заданого рівня значущості α .

Тестові T -статистики відзначаються фізичним змістом – оцінка дисперсії досліджуваної функції.

T -статистика визначається за виразом

$$T = \frac{\xi - m_\xi}{\sqrt{D_\xi}} = \frac{1}{\sqrt{2\sigma_0 K}} \sum_{k=1}^K (e_k^2 - \sigma_0^2). \quad (13)$$

Моменти першого і другого порядку:

$$\begin{cases} m_T^{(0)} = 0; \\ D_T^{(0)} = 1. \end{cases} \quad \text{– для стану } S_0; \quad \begin{cases} m_T^{(1)} = \sqrt{\frac{K}{2}} \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)^2 - 1 \right]; \\ D_T^{(1)} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \right)^4. \end{cases} \quad \text{– для стану } S_1.$$

Експериментальні дослідження ефективності діагностики за однопараметровими Q - і T -статистиками виконувались по вібросигналам з корпусу двигунів тракторно-автомобільного парку. За результатами досліджень встановлена ймовірність помилки діагностики, яка не перевищувала 0.05.

В дисертаційній роботі проведений двопараметровий контроль в задачах діагностики стану вібраційних об'єктів.

Комплексна статистика контролю

$$g(X) = \ln[W(X)] \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \end{matrix} \quad \text{або} \quad g(X) = (AX + B)(AX + B) + C,$$

де $X = (x_1, x_2)$ – випадковий вектор спостережень зі складовими: $x_1 = T$ (13) і $x_2 = Q$ (12); $A = (a_1, a_2)$, $B = (b_1, b_2)$, $C = (c_1, c_2)$ – не випадкові вектори, компоненти яких є функціями числових характеристик:

$$m_T^{(0)}, m_T^{(k)}, D_T^{(0)}, D_T^{(k)}, m_Q^{(0)}, m_Q^{(k)}, D_Q^{(0)}, D_Q^{(k)}$$

статистик виявлення T та Q .

Компоненти векторів A , B і C при

$$\begin{cases} m_T^{(0)} = m_Q^{(0)} = 0; \\ D_T^{(0)} = D_Q^{(0)} = 1 \end{cases}$$

визначаються за виразами:

$$\begin{cases} a_1 = (1/D_T^{(k)} - 1)^{1/2}; \\ a_2 = (1/D_Q^{(k)} - 1)^{1/2}; \\ b_1 = -(m_T^{(k)} / D_T^{(k)})(1/D_T^{(k)} - 1)^{-1/2}; \\ b_2 = -(m_Q^{(k)} / D_Q^{(k)})(1/D_Q^{(k)} - 1)^{-1/2}; \\ c_1 = m_T^{(k)} D_T^{(k)-1} (1/D_T^{(k)} - 1)^{-1} + \ln(D_T^{(k)}); \\ c_2 = m_Q^{(k)} D_Q^{(k)-1} (1/D_Q^{(k)} - 1)^{-1} + \ln(D_Q^{(k)}). \end{cases}$$

Ймовірності помилок α , β , двопараметрового контролю відповідають виду щільності $f(\zeta/S_j)$. Ймовірність помилки діагностики не перевищує 0.01.

У розділі представлено використання кумулятивних статистик для тестової оптимізації коваріаційних перетворень вейвлет-зображень. Процедура передбачає розрахунок сум $Q_0 \div Q_3$, Q_Δ . Залишкова сума – $\bar{Q}_\Delta = Q_\Delta(N - 2s)^{-1}$, де N – загальне число вейвлет-коефіцієнтів, що підпадає під коваріаційне перетворення.

T -статистика використовується для тестування на відсутність неоднорідності умовних (за станами S_0 і S_1) середніх залишкових сум:

$$\begin{cases} \bar{Q}_\Delta^{(0)} - \text{для стану } S_0; \\ \bar{Q}_\Delta^{(1)} - \text{для стану } S_1 \end{cases}$$

і має вигляд

$$T = \sqrt{\frac{N - 2s}{2}} \left[\frac{Q_\Delta^{(1)}}{Q_\Delta^{(0)}} - 1 \right].$$

Умова вибору оптимального по мінімуму неоднорідності залишкових дисперсій ($\bar{Q}_\Delta^{(0)}$ і $\bar{Q}_\Delta^{(1)}$) кількості $s_{opt} - T^* \in (-U_{\alpha/2}, U_{\alpha/2})$, а для рівня значущості при тестуванні – $\alpha = 0.05$, значення $U_{\alpha/2} = 1.96$.

В результаті тестування вейвлет-коефіцієнтів на відсутність статистичної неоднорідності оцінені: число порушень однорідності ν , оцінки математичного сподівання m_T , T -статистики (при справедливості гіпотези H_0).

Оскільки, тільки для $s = 3$ має місце перетин подій $\nu_{\min} = 5$ і $|m_T| = 0.05836$, то це значення s є оптимальним ($s_{opt} = 3$).

На рис. 5 представлено вплив кількості частинних регресій s на абсолютне відхилення $|m_T|$ математичного сподівання кумулятивної статистики від нульового нормативного значення, для якого залишкова дисперсія частинних регресій – однакова.

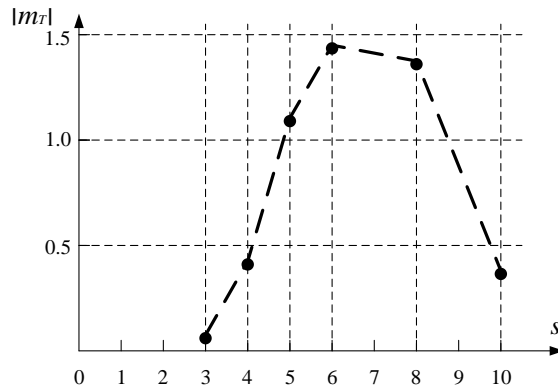


Рисунок 5 – Графічна ілюстрація впливу числа регресій s на характеристики неоднорідності залишкових регресій

З рис. 5 витікає, що максимальна стабільність залишкової дисперсії частинних регресій відповідає кількості останніх, що дорівнює $s = 3$. Одержаний результат дозволяє планувати перетворення вейвлет-зображень в інформативні F -статистики, використовуючи тільки три частинні регресії. З рис. 5 виходить також, що найгірший варіант використання частинних регресій відповідає кількості $s = 6$.

Основні наукові результати даного розділу:

- розроблена двопараметрова модель кумулятивних статистик та досліджена залежність їх числових характеристик від змін функціонального стану вібраційного об'єкту;
- доведена можливість використання кумулятивних статистик для аналізу тривимірних вейвлет-зображень;
- доведена можливість планування перетворення вейвлет-зображень в систему F -статистик при використанні мінімальної кількості частинних регресій.

У шостому розділі представлені результати досліджень з розробки математичних моделей ідентифікації дефектів в об'єктах вібродіагностики та дослідження метрологічних характеристик вимірювальних каналів діагностичних пристроїв.

Для отримання математичної моделі вібраційних об'єктів шляхом практичної ідентифікації використана імітаційна установка, структура якої зображена на рис. 6.

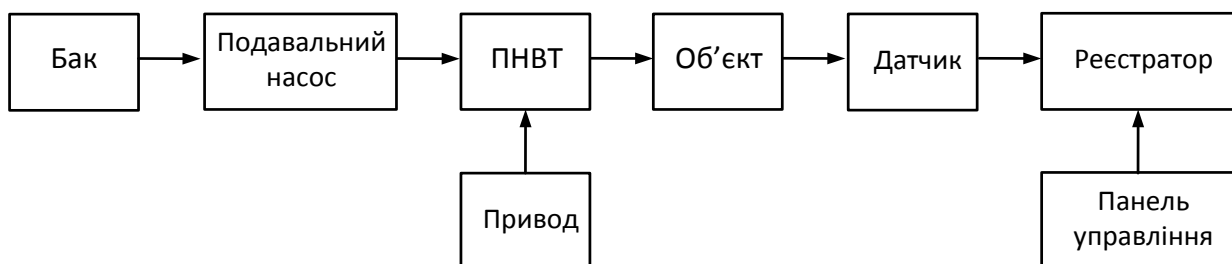


Рисунок 6 – Структурна схема імітаційної установки

При експериментальних дослідженнях датчик вібрації встановлювався на трубку паливного насоса високого тиску (ПНВТ) і здійснювалось спрацюву-

вання форсунки дизельного двигуна, що призводило до вібрації самої трубки. За результатами експериментів встановлені структура і параметри вібраційних моделей

$$G(s) = \frac{k}{1 + 2sT_2 + s^2T_1^2} e^{-s\tau}, \quad (14)$$

де $G(s)$ – передавальна функція; k – коефіцієнт передачі; s – комплексна змінна в перетворенні Лапласа; τ – транспортне запізнення, та на базі (14) отримана загальна модель об'єкта діагностування з розподіленими параметрами зі структурою

$$\mathbf{G}_o = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

де функції G_{ii} визначають передачу впливу роботи вузлів об'єкту самого на себе; функції G_{ij} відображають перехресні впливи.

Модель (15) дозволила виявити динамічні характеристики досліджуваного вібраційного об'єкту, визначити оптимальне розміщення датчиків, компенсувати вплив сторонніх дестабілізуючих факторів.

При дослідженнях, за критеріями прийняття рішень в умовах невизначеності – Лапласа, Севіджа, Гурвіца, вибраний оптимальний тип датчиків вібрації, побудований вимірювальний канал вібрації і досліджені метрологічні характеристики. Проведено діагностування стану вібраційного об'єкту за енергетичними параметрами, отримані основні метрологічні характеристики діагностичної установки. Розроблена і досліджена статистична модель бездемонтажного контролю похибок первинного вимірювального перетворення.

У розділі представлені найбільш перспективні розробки та технічні рішення, завдяки яким вирішені поставлені задачі в системах контролю та діагностування, що засновані на принципах неруйнівного контролю та безрозбірних технологій. Наведені результати розробки та удосконалення п'єзоелектричного датчика вібрації (захищено патентами України), розробки приладу контролю стану вібраційних об'єктів, розробки та використання в промисловості системи вібродіагностики стану вібраційних об'єктів. Зразки впровадження результатів дисертаційної роботи наведені на рис. 7.

На всі інженерні розробки із вдосконалення інформаційно-вимірювального забезпечення систем контролю та діагностування об'єктів одержано акти випробування або довідки використання результатів дисертаційної роботи.

Результати розділу:

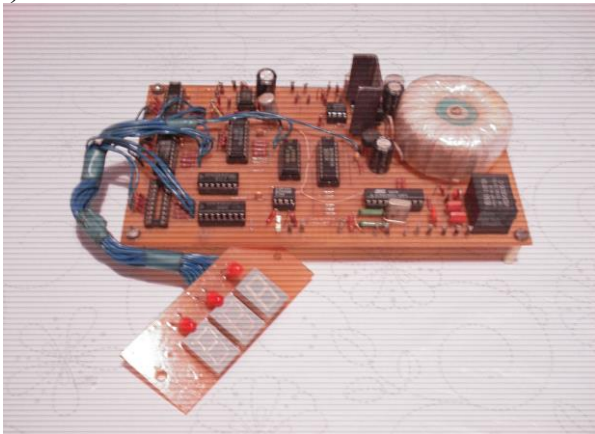
- виявлена структура і параметри детермінованої моделі вібраційного об'єкту та досліджені можливості підвищення вірогідності проведення функціональної діагностики;

- розроблена і досліджена статистична модель бездемонтажного контролю похибок первинного вимірювального перетворення та показана принципова можливість виявлення змін мультиплікативних похибок резервованих первинних перетворювачів без відключення останніх на перевірку, на основі використання випадкових вхідних сигналів з регульованими рівнями нестационарності за їх математичним сподіванням;

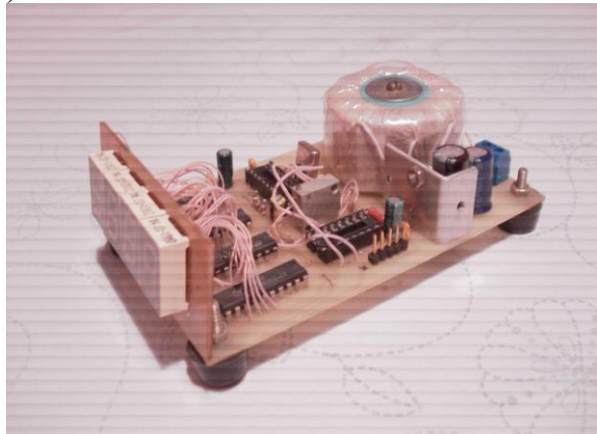
- розроблений, досліджений та впроваджений інформаційно-вимірювальний канал перетворення механічної вібрації в електричний сигнал та виявлені його основні метрологічні характеристики;

- на основі аналітичних досліджень та постановки пасивного експерименту визначені функціональна і регресійна залежності зміни амплітуди енергетичного параметру у часі, і доведена можливість їх використання для синтезу алгоритмічного забезпечення систем контролю і діагностування.

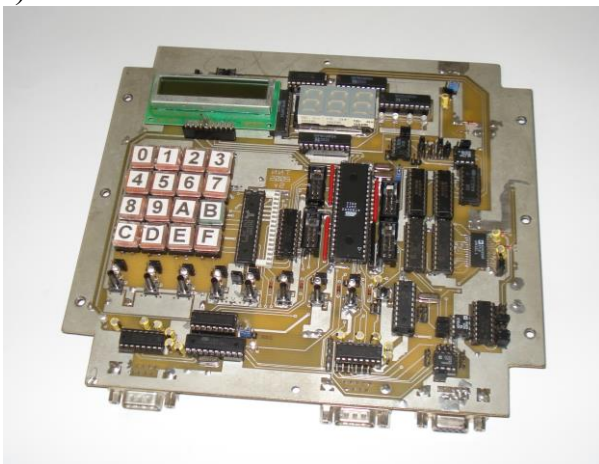
а)



б)



в)



г)



Рисунок 7 – Зразки впровадження пристроїв діагностичних систем:

- а) – електронний блок системи вібродіагностики;
- б) – інтерфейс системи вібродіагностики;
- в) – плата діагностичної установки;
- г) – інформаційно-вимірювальна система діагностування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична проблема підвищення інформаційної ефективності і статистичної вірогідності багатопараметрової функціональної діагностики вібраційних об'єктів зі стохастичними властивостями.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. Здійснений синтез інформаційної математичної моделі вимірювально-логічних перетворень для процедури функціональної діагностики з урахуванням обмеженості апріорної інформації про властивості об'єкта діагностики та доведена практична доцільність використання лінійних вирішувальних правил, що зменшує ефекти впливу апріорної недостатності навчальних вибірок на ризики діагностики. Це дозволило визначити умови багатомірної корекції зміщень в оцінках коефіцієнтів лінійної вирішувальної функції і довести, що корекція ймовірностей помилок діагностики як першого так і другого роду може бути виконана за рахунок правильного вибору співвідношення між адитивними і мультиплікативними систематичними похибками первинних перетворень в багатомірній функціональній діагностиці.

2. Обґрунтовано системну класифікацію видів вірогідності функціональної діагностики, що враховує якісні та кількісні прояви порушень при синтезі вирішувальних функцій через обмеження обсягу навчальних вибірок, що дозволило обрати конкретні види вірогідності діагностики, які враховують обсяги навчальних вибірок і допускають статистичне оцінювання їх величин при заданій довірчій ймовірності.

3. Показана можливість планування вейвлет-перетворення віброцигалів для отримання двовимірної кількісної інформації у просторі «масштаб-зсув», при формуванні тривимірних моделей вейвлет-перетворення. Доведена ефективність локально-регресійного аналізу випадкових послідовностей вейвлет-коефіцієнтів не тільки для зсуву, а і для масштабу при використанні тривимірної моделі вейвлет-перетворення спектрально-нестационарних вібраційних сигналів. Це дозволило зменшити розмірність вейвлет-зображення, виділивши при цьому чотири інформативних критеріальних F -статистики дисперсійних відношень, що мають значуще функціональне розходження за видами стану об'єкта вібраційної діагностики.

4. Показана можливість функціонального діагностування за геометричною відстанню функції інформативних параметрів F -статистик вейвлет-перетворених віброцигалів. Розроблена методика формування оптимальної розмірності простору F -статистик, що забезпечує мінімум ймовірності помилки діагностики другого роду або максимум потужності правила прийняття рішення. Показано, що використання критерію мінімуму середнього ризику максимізує не тільки вірогідність вібродіагностики, а й дозволяє вибрати статистично значущі значення параметрів масштабу і зсуву в моделі вейвлет-перетворення. Це дозволило підвищити ефективність використання F -статистик вейвлет-коефіцієнтів, коли використовується шкала частот (масштабу) і дисперсії коли

використовують шкалу часу (зсуву) при ідентифікації зміни діагностованих станів за вейвлет-зображеннями.

5. Обґрунтовано введення одно- і двопараметрових інформативних критеріальних кумулятивних статистик при контролі та діагностиці функціонального стану вібраційних вузлів промислових об'єктів за множинами інформативних параметрів, що реагують на зміни вейвлет-коефіцієнтів уздовж осі часу (зсуву) або осі частот (масштабу). Це дозволило планувати процедури локально регресійних перетворень тривимірних вейвлет-зображень і коректувати діагностичні початкові умови для одержання максимуму вірогідності діагностичних рішень.

6. Показана можливість підвищення метрологічної надійності первинних віброперетворювачів за рахунок використання структурної надмірності перетворень та статистичної інформації відносно взаємно кореляційних властивостей їх вихідних сигналів, що дозволило розвинути теорію і методи бездемонтажного контролю метрологічних характеристик первинних віброперетворювачів в умовах апріорної спектральної нестационарності механічних факторних впливів.

7. Отримали розвиток теорія і методи структурної і параметричної ідентифікації динамічних характеристик засобів вимірювальної техніки у розподілених інформаційних вимірювальних системах вібродіагностики. Отримана інформаційна модель зовнішніх дестабілізуючих факторів, які впливають на нормальне функціонування вібраційних об'єктів у ході їх практичної роботи, що дозволило розробити методики оцінювання рівня цих дестабілізуючих факторів.

8. Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджені на ДП «Завод ім. Малишева» (м. Харків) – вітчизняному виробнику дизельного устаткування для виконання заходів з доведення діагностичних систем двигунів Д80; на ДП «Харківський бронетанковий завод» (м. Харків) – вітчизняному споживачу силового обладнання на базі дизелів для дослідження вібраційних процесів, що відображають верифіковані стани двигунів танків Т64, Т72; на ТОВ «НВФ ДКБ Холодмаш» (м. Харків) – вітчизняному виробнику енергетичного обладнання для корекції вимірювальних каналів мікропроцесорної системи вібродіагностики функціональних порушень; в ДУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування» (м. Харків) для випробування функціонування промислових динамічних об'єктів; в ДУ «Інститут загальної та невідкладної хірургії ім. В.Т. Зайцева НАМН України» (м. Харків) для оптимізації процедур динамічного контролю вібраційних режимів високо обертових центрифуг.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мигущенко Р. П. Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів: монографія / Р. П. Мигущенко. – Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2014. – 224 с.

2. Мигущенко Р. П. Методика идентификации процессов рабочей зоны ДГУ / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Валуйская // Системи обробки інформації. – Харків. – 2003. – Вип. 3. – С. 75 – 80.

Здобувачем виконана розробка алгоритмічного забезпечення методики ідентифікації процесів у вібраційних промислових об'єктах.

3. Мигущенко Р. П. Исследование абсолютного остаточного ресурса работоспособности форсунок дизель-генераторных установок / Р. П. Мигущенко, В. К. Гусельников, О. Ю. Кропачек // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2003. – № 26. – С. 115 – 118.

Здобувачем проведені аналітичні дослідження залишкового ресурсу вузлів вібраційних промислових об'єктів.

4. Мигущенко Р. П. Исследование точностных характеристик измерительного преобразователя диагностической установки дизельных агрегатов / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2003. – № 5. – С. 84 – 85.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження точнісних характеристик вимірювальних перетворювачів діагностичної установки.

5. Мигущенко Р. П. Классификация состояния форсунок дизель-генераторной установки по числовым характеристикам / Р. П. Мигущенко, В. К. Гусельников, О. Ю. Валуйская // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2004. – №5. – С. 133 – 137.

Здобувачем розроблена класифікація стану вузлів промислових вібраційних об'єктів за експериментальними числовими характеристиками.

6. Мигущенко Р.П. Определение типовых неисправностей форсунок дизельных агрегатов с помощью тестовых статистик / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2004. – № 4. – С. 116 – 119.

Здобувачем розроблена методика визначення типових несправностей вузлів промислових вібраційних об'єктів за допомогою тестових однопараметрових і двопараметрових кумулятивних статистик.

7. Мигущенко Р. П. Анализ вопросов построения математических моделей дизельных агрегатов и компенсирования перекрестных связей / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, Д. О. Коваленко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2004. – № 47. – С. 87 – 91.

Здобувачем розроблена модель робочої зони вібраційного промислового об'єкту шляхом практичної ідентифікації, визначені умови найкращого розміщення первинного перетворювача вібрації в робочій зоні промислового об'єкту.

8. Мигущенко Р. П. Аналитические исследования многосвязности процессов в дизель-генераторных установках / Р. П. Мигущенко, В. К. Гусельников, О. Ю. Валуйская // Радіоелектроніка і інформатика. – Харків. – 2004. – №1. – С. 74 – 78.

Здобувачем проведений синтез аналітичної моделі вібраційного промислового об'єкту з розподіленими параметрами та синтез математичної моделі компенсатора перехресних зв'язків.

9. Мигущенко Р. П. Анализ задачи построения системы отсчетов измерительного вибросигнала топливного насоса высокого давления дизельных уста-

новок / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, Д. О. Коваленко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2005. – № 38. – С. 131 – 135.

Здобувачем застосована формула математичної моделі оцінки дисперсії динамічного процесу за корельованими відліками на визначеному інтервалі спостереження.

10. Мигущенко Р. П. Стенд отладки микропроцессорных приборов / Р.П. Мигущенко, В. І. Бакум, О. Ю. Кропачек, О. Є. Тверитникова, М. І. Опришкіна // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2008. – № 31. – С. 113 – 117.

Здобувачем розроблено та впроваджено структурні, алгоритмічні, програмні і конструктивні рішення при створенні стенда відладки мікропроцесорних приладів.

11. Мигущенко Р. П. Оптимальный выбор первичных преобразователей вибрации / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, Т. В. Печериця // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2011. – № 4/9. С. 21 – 23.

Здобувачем здійснений вибір і реалізація критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності при оптимальному виборі типу первинного перетворювача механічної вібрації.

12. Мигущенко Р. П. Аналіз питань компенсації адитивних збурень при діагностиці дизельних агрегатів / Р.П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, Т. В. Печериця, К. В. Матяш // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2012. – № 27. – С. 154 – 159.

Здобувачем отримані математична і схемотехнічна моделі промислового об'єкту з розподіленими параметрами; визначені за експериментальними даними форми поправочної кривої для зменшення адитивної складової похибки при зміні систематичних детермінованих впливів на вібраційний об'єкт.

13. Мигущенко Р. П. Дослідження системи управління вібраційним об'єктом / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, А. С. Семенченко, К. В. Матяш // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2013. – Вип. 5. С. 177 – 183.

Здобувачем проведене імітаційне моделювання поведінки вібраційного об'єкту в умовах зовнішніх збурень.

14. Мигущенко Р. П. Оцінка стаціонарності вібраційних процесів паливної системи дизельних двигунів / Р. П. Мигущенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2013. – Вип. 54. С. 155 – 162.

15. Мигущенко Р. П. Синтез двумерных диагностических параметров при ковариационном анализе трехмерных вейвлет-преобразований вибросигналов / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигущенко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця. – 2013. – №3. – С. – 69 – 75.

Здобувачем виконане імітаційне моделювання, формування вейвлет-зображень, оцінка чисельних значень статистик коваріаційного аналізу.

16. Мигущенко Р. П. Експериментальна перевірка моделі оптимізації простору діагностичних параметрів при вейвлет-перетвореннях вибросигналів дизельних агрегатів / Р. П. Мигущенко // Вісник Національного транспортного університету. – Київ. – 2013. – №28. – С. 343 – 350.

17. Мигущенко Р. П. Оптимизация пространства диагностических параметров при вейвлет-преобразованиях вибросигналов / Р. П. Мигущенко // Вестник БГТУ им. Шухова. – Белгород. – 2014. – №3. – С. 153 – 157.

18. Мигущенко Р. П. Структурно-алгоритмічна оптимізація систем вібродіагностики за критерієм мінімуму імовірності помилки / Р. П. Мигущенко // Метрологія і прилади. – Харків. – 2014. – №1. – С. 168 – 171.

19. Мигущенко Р. П. Статистическая оптимизация модели вибродиагностики по минимуму среднего риска / Р. П. Мигущенко // Методы та прилади контролю якості. – Ів.-Франківськ. – 2014. – №1. – С. 3 – 8.

20. Мигущенко Р. П. Экспериментальные исследования при оптимизации систем вибродиагностики по критерию минимума среднего риска / Р. П. Мигущенко // Системи обробки інформації. – Харків. – 2014. – №. 4 (120). – С. 40 – 44.

21. Мигущенко Р. П. Однопараметровый контроль стану динамічних промислових об'єктів за допомогою тестових статистик / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, М. П. Артьомов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2014. – №6. – С. 245 – 250.

Здобувачем сформульовані теоретичні засади застосування тестових кумулятивних характеристик при оцінці стану промислових об'єктів за їх вихідними вібраційними характеристиками.

22. Мигущенко Р.П. Контроль состояния динамических объектов с помощью однопараметровых тестовых статистик / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. Тынышпаева. – Алматы. – 2014. – № 2 (87). – С. 23 – 28.

Здобувачем сформульовані теоретичні засади застосування тестових кумулятивних характеристик при оцінці стану промислових динамічних об'єктів за їх моделями вейвлет-перетворення вібраційних сигналів.

23. Мигущенко Р. П. Контроль состояния динамических объектов с помощью двухпараметровых кумулятивных тестовых статистик / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Вестник Государственного университета имени Шакарима города Семей. – Семипалатинск. – 2014. – № 2. – С. 22 – 27.

Здобувачем визначені ефективності двопараметрового контролю та діагностики функціонального стану вібраційних промислових об'єктів за вібраціями їх вузлів при допомозі кумулятивних статистик.

24. Мигущенко Р. П. Статистическая модель бездемонтажного контроля погрешностей первичного измерительного преобразования измерительного преобразователя / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигущенко, М. І. Шпарьова // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2014. – № 15. – С. 146 – 151.

Здобувачем визначені властивості статистичної моделі параметру контролю.

25. Мигущенко Р. П. Дослідження впливу систематичних похибок вимірювання на ризики функціональної діагностики / Р. П. Мигущенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. – 2014. – Вип. 19. – С. 147 – 154.

26. Мигущенко Р. П. Анализ вероятностных моделей параметрических правил принятия решений функциональной диагностики / Р. П. Мигущенко // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель. – 2014. – Вып. 3. – С. 17 – 21.

27. Мигущенко Р. П. Исследование влияния ограниченности априорной информации на вид и размер достоверности диагностики / Р. П. Мигущенко // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г.Шухова. – 2014. – №6. – С. 201 – 204.

28. Патент України №89000, МПК G01H 1/16. П'єзоелектричний вимірювальний перетворювач вібрації / Щапов П.Ф., Мигущенко Р.П., Бойко В.В., Замятін П.М, по заявці № у 2013 12273, опубл. 10.04.2014, бюл. №7/2014.

Здобувачем виконано формування структури п'єзоелектричного вимірювального перетворювача вібрації.

29. Патент України №92929, МПК G01H 1/16. П'єзоелектричний вимірювальний перетворювач вібрації / Сокол Є.І., Щапов П.Ф., Мигущенко Р.П., Бойко В.В., Замятін П.М, по заявці № у 2014 03592, опубл. 10.09.2014, бюл. №17/2014.

Здобувачем здійснена оцінка вихідних технічних характеристик п'єзоелектричного вимірювального перетворювача вібрації.

30. Мигущенко Р.П. Оптимальный выбор датчика вибрации для диагностики дизельных агрегатов / Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Т.В. Печериця // Матеріали 19-ої Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків. – 2011. – С. 121.

Здобувачем виконана постановка задачі оптимального вибору первинних перетворювачів за багатопараметровим критеріальним базисом на основі теорії ігор.

31. Мигущенко Р. П. Оценка влияния собственных колебаний дизельных агрегатов при диагностировании исправности форсунок топливной системы / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, Т. В. Печериця, К. В. Матяш // Матеріали 20-ої Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків. – 2012. – С.121.

Здобувачем сформульована постановка задачі оцінки впливу власних коливань дизельних агрегатів при діагностуванні справності вузлів паливної системи дизельних агрегатів.

32. Мигущенко Р.П. Постановка задачи исследования вибрационного промышленного объекта / А.С. Гуренко, Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Матеріали 21-ої Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», ч. 2. – Харків. – 2013. – С. 104.

Здобувачем побудована та досліджена математична модель процесів у вібраційному об'єкті.

33. Мигущенко Р.П. Построение математической модели тормозного привода автомобиля / К.В. Матяш, Р. П. Мигущенко // Матеріали 21-ої Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», ч. 2. – Харків. – 2013. – С. 123.

Здобувачем отримана регресійна модель складного динамічного об'єкту.

34. Мигущенко Р. П. Исследование влияния случайных погрешностей оценивания коэффициентов решающей функции на количество диагностической информации / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Сборник докладов Национального Научного Симпозиума с международным участием «Метрология и метрологическое обеспечение». – Созопол. – 2014. – С. 109 – 113.

Здобувачем визначено умови отримання максимуму діагностичної інформації за кількістю інформативних параметрів, що забезпечує мінімально можливі значення ризиків діагностики першого і другого роду.

АНОТАЦІЇ

Мигущенко Р.П. Методи і пристрої систем багатопараметрової функціональної діагностики вібраційних об'єктів (теоретичні основи та впровадження). На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми – підвищенню інформаційної ефективності і статистичної вірогідності функціональної діагностики вібраційних об'єктів зі стохастичними властивостями.

На основі інформаційних і ймовірнісних властивостей показників ефективності параметричних процедур вібродіагностики були обрані діагностична модель і клас статистичних вирішувальних функцій, які забезпечують вирішення параметрової задачі функціональної діагностики.

Використання локалізованого спектрального аналізу (вейвлет-аналізу) вібросигналів, з подальшим локально-регресійним перетворенням вейвлет-коефіцієнтів, дозволило сформулювати, дослідити і оптимізувати простір інформативних параметрів для виконання процедури вібродіагностики.

Проведений однопараметровий і двопараметровий контроль стану вібраційних об'єктів за допомогою кумулятивних статистик.

Виконані дослідницькі роботи щодо ідентифікації дефектів в об'єктах вібродіагностики, побудови математичних моделей вібраційних об'єктів з розподіленими параметрами, оптимального вибору первинного перетворювача вібрації, визначення метрологічних характеристик вимірювального каналу вібрації.

Здійснені впровадження інженерних розробок дисертаційної роботи на провідних промислових підприємствах Харкова.

Ключові слова: функціональна діагностика, вирішувальна функція, вейвлет-аналіз, кумулятивні статистики, невизначеність, ймовірність, вірогідність, надійність, діагностична установка, інформаційно-вимірювальна система.

Мигущенко Р.П. Методы и устройства систем многопараметровой функциональной диагностики вибрационных объектов (теоретические основы и внедрение). На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2014.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы – повышению информационной эффективности и статистической достоверности функциональной диагностики вибрационных объектов со стохастическими свойствами.

В работе проанализированы: источники информационной неопределенности измерительных сигналов в современных системах технического контроля и диагностики промышленных объектов; существующие методы повышения достоверности контроля и диагностики при параметрической неопределенности сигналов измерительной информации; источники неопределенности диагностических решений при контроле технического состояния сложных вибрационных объектов; информационно-измерительные технологии неразрушающего контроля и функциональной диагностики по случайным вибросигналам. На основе информационных и вероятностных свойств показателей эффективности параметрических процедур вибродиагностики были выбраны диагностическая модель и класс статистических решающих функций, которые обеспечивают решение параметрической задачи функциональной диагностики при априорной неопределенности условий измерительного эксперимента.

Синтезирована информационная модель процедуры альтернативной функциональной диагностики. Исследовано влияние на информационные свойства этой модели систематических погрешностей измерения значений входных сигналов, влияние случайных погрешностей оценивания коэффициентов диагностической и решающей функций, влияние ограниченности априорной информации о видах диагностируемых состояний на величину достоверности принятия решения. Показано, что количество ожидаемой диагностической информации зависит от априори заданных параметров плана диагностического эксперимента и определенных условий максимизации количества информации в зависимости от рисков диагностики первого и второго рода, априорных вероятностей состояний объекта диагностики и геометрических расстояний между этими состояниями в пространстве задаваемых информативных признаков. Показано, что возможны варианты сочетания аддитивных и мультипликативных погрешностей измерения вектора информативных параметров, которые не вызывают уменьшение достоверности диагностики. Доказано, что существует взаимосвязь между размерностью вектора информативных параметров системы функциональной диагностики и объемом обучающей выборки по видам диагностируемых состояний, что обеспечивает максимум количества диагностической информации.

Использование локализованного спектрального анализа (вейвлет-анализа)

вибросигналов, с последующим локально-регрессионным преобразованием вейвлет-коэффициентов, позволило сформировать, исследовать и оптимизировать пространство информативных параметров для выполнения процедуры вибродиагностики. Доказана эффективность локально-регрессионного анализа трехмерной модели вейвлет-преобразования для получения информативных параметров в форме критериальных F -статистик дисперсионного отношения. Такой анализ позволил резко уменьшить размерность вейвлет-изображения (без потери диагностической информации), выделив при этом не более десяти отсчетов для четырех информативных критериальных статистик дисперсионных отношений, имеющих значимое функциональное различие по видам состояния объекта вибрационной диагностики. Полученные статистики, будучи случайными величинами с известным законом распределения, позволили оценить вероятности ошибок диагностики на базе стандартных параметрических моделей дискриминантного анализа. Локально-регрессионный анализ вейвлет-преобразований позволил планировать измерения для локализованных во времени спектрально-нестационарных вибрационных сигналов. Показана возможность оценивания, по геометрическим расстояниям между диагностированными состояниями, информативности статистик вейвлет-преобразованных вибросигналов. Разработана методика формирования оптимальной размерности пространства критериальных статистик, что обеспечило минимум вероятности ошибки диагностики второго рода (максимум мощности правила принятия диагностического решения).

Разработана теория оптимальных статистических решений в задаче поиска глобального минимума вероятности ошибки диагностики состояния сложных вибрационных промышленных объектов. Доказано, что использование критерия минимума среднего риска диагностики позволило не только максимизировать достоверность последней, но и планировать выбор статистически значимых значений параметров масштаба и сдвига в модели вейвлет-преобразования. Разработана методика двухэтапной структурно-алгоритмической оптимизации, которая обеспечивает минимум полной вероятности ошибки диагностики, а следовательно и максимум ее достоверности.

Проведен однопараметровый и двухпараметровый контроль состояния вибрационных объектов с помощью кумулятивных статистик, чувствительных к изменению мощности исследуемых случайных процессов. Использование таких статистик позволило разработать методику определения оптимального количества последовательных линейных частных регрессий при аппроксимации вейвлет-коэффициентов в задаче синтеза критериальных F -статистик дисперсионного отношения (информативных диагностических параметров).

Выполнены исследовательские работы по идентификации дефектов в объектах вибродиагностики, построения математических моделей вибрационных объектов с распределенными параметрами, синтеза статистической модели бездемонстрационного контроля погрешностей первичного измерительного преобразования измерительного преобразователя, оптимального выбора первичного преобразователя вибрации, определения метрологических характеристик изме-

рительного канала вибрации и диагностической установки в целом.

Осуществлены внедрения инженерных разработок диссертационной работы, которые содержат аппаратное, алгоритмическое и программное обеспечение, на ведущих промышленных предприятиях Харькова.

Ключевые слова: функциональная диагностика, решающая функция, вейвлет-анализ, кумулятивные статистики, неопределенность, вероятность, достоверность, надежность, диагностическая установка, информационно-измерительная система.

Mygushchenko R.P. Methods and apparatus of systems for multiparameter functional diagnostics of vibrating objects (theoretical foundations and implementation). Manuscript.

Thesis for scientific degree of Doctor of Science (Technology), Specialty 05.11.13 – Instruments and Methods of Control and compounds' composition determination. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2014.

The solutions of such important scientific and applied problems as increasing information efficiency, devices' probability and reliability, the methods of multiparameter functional diagnostics of complex vibrating objects are given in thesis.

The diagnostic model and statistical solving functions, that provide a solution for the problem of parametric functional diagnostics has been selected. The base for this has been informative and probabilistic properties of efficiency procedures indicators.

Using the localized spectral analysis (wavelet analysis) of vibration signals, followed by local-regression wavelet transformation coefficients, allowed to generate, investigate and optimize space informational parameters for the vibrodiagnostic procedure implementation.

Using cumulative statistics singleparameter and twoparameters control of vibrating objects state has been made.

Following tasks has been completed: defects identification in objects of vibrodiagnostic, mathematical models creation for vibrating objects with distributed parameters, the optimal choice of primary vibration transformer, metrological characteristics determination for measuring vibration channel.

The Engineering developments were implemented at some leading industrial enterprises in Kharkiv.

Keywords: functional diagnostics, decision function, wavelet analysis, cumulative statistics, uncertainty, probability, reliability, tester system, information-measuring system.

