

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

УДК 004.93'11:004.942

Фомін Олександр Олексійович



**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВТОРИННОЇ СПЕКТРАЛЬНО-  
СТАТИСТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕЛІНІЙНИХ ІНЕРЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ  
В СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

Спеціальність 05.13.06 – Інформаційні технології

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Одесса – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті на кафедрі комп'ютеризованих систем управління.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Павленко Віталій Данилович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
професор кафедри комп'ютеризованих систем  
управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Ленков Сергій Васильович**,  
заслужений діяч науки і техніки України, лауреат  
Державної премії України в галузі науки і техніки,  
Київський національний університет ім. Тараса  
Шевченка, головний науковий співробітник науково-  
дослідного центру Військового інституту

доктор технічних наук, професор  
**Поворознюк Анатолій Іванович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», професор кафедри  
обчислювальної техніки та програмування

доктор технічних наук, професор  
**Субботін Сергій Олександрович**,  
Запорізький національний технічний університет,  
завідувач кафедри програмних засобів

Захист відбудеться “20” червня 2019 року о 13:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка 1.

Автореферат розісланий “20” травня 2019 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01



Колесніков О.Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** З ростом складності сучасних об'єктів та умов їх експлуатації у різних галузях промисловості, медицини, економіки посилюється роль автоматизованих систем технічного діагностування (АСТД) в задачах своєчасного і достовірного визначення виду технічного стану, пошуку місця та причин відмови об'єктів діагностування (ОД) щодо попередження аварій, оцінки якості виробів, мінімізації витрат при технічному обслуговуванні тощо.

За умов великого інтересу з боку практики розповсюдженими стають прикладні задачі діагностування складних об'єктів навколишнього світу, основу яких складають нелінійні інерційні об'єкти, у тому числі з неперервними характеристиками та невідомою структурою, які можна розглядати як «чорний ящик». Прикладами таких об'єктів, що досліджуються в роботі, в промисловості є електричні двигуни, інструменти в системах обробки металів, в біомедицині – об'єкти живої природи, в економіці – маркетингові заходи.

Часто такі об'єкти супроводжуються апріорною невизначеністю, серед причин виникнення якої розглядаються недостатня вивченість процесів, що протікають в ОД, а також, експлуатація у широкому діапазоні зовнішніх умов, наявність великої кількості збурюючих впливів і перешкод навколишнього середовища.

Для первинного опису означених ОД – побудови інформаційних моделей – доцільно використовувати інтегральні непараметричні динамічні моделі на основі багатовимірних вагових (БВФ) та багатовимірних перехідних функцій (БПФ), які визначаються за даними експерименту «вхід–вихід». Головними перевагами застосування означених моделей в задачах діагностування є здатність враховувати несправності, спричинені як зміною параметрів ОД, так і його структури, а також зручність використання при тестовому і функціональному діагностуванні.

Завдяки одночасному урахуванню нелінійних та інерційних властивостей ОД інтегральні непараметричні динамічні моделі забезпечують високу достовірність діагностування, але великий обсяг первинної ідентифікаційної інформації приводить до зниження оперативності налаштування АСТД. Зменшення обсягу первинної ідентифікаційної інформації шляхом використання більш компактних моделей (наприклад, інтегралів згортки) дозволяє підвищити оперативність налаштування АСТД, але приводить до зниження достовірності діагностування. Таким чином виникає протиріччя між достовірністю технічного діагностування (ТД) і оперативністю налаштування АСТД при використанні інтегральних непараметричних динамічних моделей. Це протиріччя може бути розв'язане за рахунок застосування вторинної ідентифікації – побудови діагностичних моделей з суттєво меншим розміром діагностичної інформації (редукції інформаційних моделей).

Поширені методи редукції моделей, засновані на інформаційному та компонентному аналізі, потребують великого обсягу апріорних даних, отже, орієнтовані на роботу ОД у визначених режимах функціонування та діапазонах зовнішніх умов. Розширення сфери практичних застосувань, адаптація до нових функціональних вимог, експлуатації у широкому діапазоні зовнішніх умов

призводить до зростання апіорної невизначеності даних про об'єкт, а отже, до зменшення достовірності діагностування та її завадостійкості.

В дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до побудови діагностичних моделей на основі вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД. Використання такого підходу дозволяє одночасно забезпечити редукцію інформаційних моделей завдяки спектральним перетворенням БВФ при формуванні простору діагностичних ознак та високу достовірність діагностування і її завадостійкість за рахунок застосування статистичних методів машинного навчання та процедури інформаційної оптимізації діагностичних моделей.

Наведені положення визначають актуальність розробки моделей, методів та інформаційної технології (ІТ) вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в системах ТД на основі інтегральних непараметричних динамічних моделей, що забезпечує високу достовірність та оперативність діагностування складних об'єктів різної природи в умовах апіорної невизначеності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до пріоритетних напрямків науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ), згідно координаційних планів Міністерства освіти і науки України, зокрема, в рамках держбюджетних наукових досліджень з науково-дослідницьких робіт (НДР) за участю автора: НДР «Алгоритми, програми та пристрої систем контролю, діагностики й управління технологічними об'єктами», ДР № 0105U007208 (2005 – 2008); НДР «Теоретичні основи підвищення якості систем підтримки працездатності інструментів інтегрованих виробництв на основі використання штучного інтелекту», ДР № 0106U013181 (2007 – 2009); НДР «Моделі складних технологічних об'єктів і процесів та апаратно-програмні засоби їх реалізації в системах управління», ДР № 0109U008452 (2009 – 2012); НДР «Теоретичні основи створення інтелектуальної системи діагностування, яка забезпечує скорочення витрат на різальні інструменти», ДР №0109U008463 (2010 – 2012); відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 16.01.2003, № 433 – IV: Стаття 8.3. – «Нанотехнології, мікроелектроніка, інформаційні технології, телекомунікації: інформаційні технології контролю та управління об'єктами базових технологій; інтелектуальні комп'ютерні засоби високої продуктивності; програмні системи розпізнавання об'єктів та процесів; ...» НДР «Методи та інструментальні засоби діагностичного контролю електричних двигунів на основі непараметричних динамічних моделей», ДР № 0110U008198 (2011 – 2012) відповідно до бюджетної програми «Прикладні дослідження і розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ» (КПКВ 2201040); НДР «Моделі та інформаційні технології діагностування і управління складними динамічними об'єктами», ДР № 0113U007625 (2013 – 2016) відповідно до Наказу МОН України і НАН України від 26.11.2009 №1066/609 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009 – 2013 роки»: 1.2.2. – «Дослідження складних систем різної природи, теорія та методи системного аналізу»; 1.2.1.1. – «Розробка математичних методів та систем моделювання об'єктів та процесів»; 1.2.1.4. –

«Дослідження математичних моделей, проблем комп'ютерної алгебри, оптимізації, оцінювання, ідентифікації»; НДР «Тенденції розвитку теорії маркетингу в сучасних умовах господарювання», ДР № 0113U005204 (2013 – 2017); НДР «Методологічні основи та інструментальні засоби інформаційної технології діагностування станів неперервних об'єктів із застосуванням моделей Вольтерра» ДР № 0115U000410 (2015 – 2017); а також в рамках наукових досліджень по держбюджетним НДР в Одеській національній морській академії (ОНМА) МОН України: «Теорія і методи аналізу нелінійних інерційних систем з використанням інтегро–степеневих рядів Вольтерра», ДР № 0103U006408 (2003 –2005); «Методологічні основи побудови діагностичних моделей нелінійних динамічних об'єктів та їх застосування в системах телекомунікацій», ДР № 0105U002310 (2005 – 2007); в Національному університеті «Одеська морська академія» (НУ «ОМА») МОН України: «Теоретичні засади, методи та інструментальні засоби інформаційної технології діагностування динамічних об'єктів на основі моделей Вольтерра» (2015 – 2017).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення науково-технічної проблеми підвищення достовірності та оперативності діагностування шляхом розвитку теоретичних основ побудови діагностичних моделей, розробки методів та базової інформаційної технології вторинної спектрально-статистичної ідентифікації неперервних нелінійних інерційних об'єктів різної природи в системах технічної діагностики.

Для досягнення мети дослідження поставлено і розв'язано наступні **задачі**:

- аналіз проблеми побудови моделей неперервних нелінійних інерційних ОД в системах технічної діагностики і обґрунтування вибору напрямку досліджень щодо побудови інтегральних непараметричних динамічних моделей на основі БВФ та БПФ для первинного опису об'єктів різної природи; аналіз сучасного стану методів редукції інформаційних моделей і обґрунтування вибору напрямку досліджень щодо побудови діагностичних моделей на основі вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД та процедури інформаційної оптимізації при створенні АСТД;

- розробка методу непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД, що розглядаються як «чорний ящик», на основі БПФ, які отримуються за даними експерименту «вхід–вихід» із забезпеченням прийнятної в діагностичних дослідженнях точності інформаційних моделей; адаптація розробленого методу ідентифікації до використання в різних предметних областях;

- розробка діагностичних моделей на основі спектральних перетворень інформаційних моделей ОД для стиснення простору ознак та статистичних методів машинного навчання моделей в отриманих діагностичних просторах для підвищення оперативності при збереженні достовірності діагностування; забезпечення завадостійкості запропонованих діагностичних моделей;

- розробка базової інформаційної технології вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в системах технічної діагностики, що ґрунтується на первинному описі ОД на основі інтегральних непараметричних динамічних моделей у вигляді БВФ та БПФ, побудові діагностичних моделей на основі спектральних перетворень інформаційних моделей з подальшою інформаційною оптимізацією за допомогою статистичних методів машинного навчання за заданим критерієм максимуму достовірності діагностування;

– розробка інструментальних засобів web-орієнтованої АСТД на основі базової інформаційної технології вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів, інтеграція з хмарними сервісами для вирішення ресурсномістких задач діагностування;

– впровадження моделей, методів та базової інформаційної технології вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів для діагностування ОД різної природи: технічних, біомедичних та економічних.

*Об'єкт досліджень* – процес діагностування неперервних об'єктів різної природи.

*Предмет досліджень* – моделі, методи та інформаційна технологія вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в системах технічної діагностики.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження базуються на теорії непараметричної ідентифікації та моделювання нелінійних інерційних систем на основі БВФ та БПФ для побудови інформаційних моделей; теорії функціонального аналізу (спектральні, вейвлет-перетворення) для побудови просторів діагностичних ознак; теорії машинного навчання та теорії штучних нейронних мереж для побудови діагностичних моделей ОД; теорії ймовірностей для оцінки достовірності діагностування; теорії комбінаторного аналізу для інформаційної оптимізації діагностичних моделей; теорії обчислювальних експериментів для розв'язування тестових та прикладних задач і аналізу точності та завадостійкості інформаційних моделей; засобах імітаційного моделювання для підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Головним науковим результатом роботи є розвиток теоретичних основ побудови діагностичних моделей, розробка методів та базової ІТ вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в системах технічної діагностики, що забезпечують достовірність та оперативність вирішення прикладних задач діагностування об'єктів різної природи в умовах неповної апріорної інформації.

У рамках головного результату отримані наступні наукові результати.

1. *Отримав подальший розвиток* метод діагностування нелінійних інерційних об'єктів на основі використання інформаційних моделей у вигляді БВФ та БПФ в якості джерела діагностичної інформації, який відрізняється від відомого використанням як багатоімпульсних, так і багатоступінчастих тестових сигналів та цілеспрямованим перебором діагностичних моделей за критерієм максимуму достовірності діагностування, що дозволяє підвищити достовірність та оперативність діагностування в умовах неповної апріорної інформації.

2. *Вперше отримані наступні результати.*

2.1. Запропоновано V-модель налаштування системи технічного діагностування, в якій процес налаштування на відміну від відомих, ітеративної та каскадної моделей, представлено низхідною послідовністю етапів побудови інформаційної моделі, простору діагностичних ознак та діагностичної моделі, процес верифікації представлено зворотною послідовністю етапів оцінки достовірності діагностичної моделі, оцінки діагностичної цінності простору ознак, оцінки точності інформаційної моделі, а ітерації налаштування системи виконуються між

відповідними етапами обох напрямів, що дозволяє скоротити кількість глобальних циклів процесу налаштування за рахунок збільшення локальних циклів та прискорити підбір моделі з найбільшою достовірністю діагностування та завадостійкістю.

2.2. Розроблено метод детермінованої ідентифікації нелінійних інерційних ОД у вигляді інтегральних непараметричних динамічних моделей, збудованих за даними експерименту «вхід–вихід» з використанням тестових багатоступінчастих сигналів, відмінність якого від відомих полягає у виділенні парціальних складових з відгуків та визначенні на їх основі БПФ. Це дозволяє мінімізувати методичні похибки ідентифікації інформаційних моделей, зменшити об'єм обчислень та підвищити точність моделювання ОД.

2.3. Запропоновано сімейство діагностичних моделей нелінійних інерційних ОД на основі спектральних перетворень (перетворень Карунена-Лоева, вейвлет-перетворень та моментів) піддіагональних перетинів БВФ для стиснення простору ознак та статистичних методів машинного навчання моделей в отриманих діагностичних просторах, що на відміну від використання діагональних перетинів дозволяє враховувати діагностичну інформацію, розосереджену по всій гіперповерхні БВФ в спостережуваній області визначення. Це дозволяє будувати діагностичні моделі, які забезпечують більшу достовірність діагностування та її завадостійкість за рахунок найбільш повного використання інформації первинного опису об'єктів.

2.4. Запропоновано сімейство діагностичних моделей нелінійних інерційних ОД у вигляді об'єднання діагностичних ознак, отриманих на основі БВФ різних порядків для побудови простору ознак та статистичних методів машинного навчання при побудові моделей в отриманих діагностичних просторах, що на відміну від використання перетинів БВФ окремих порядків, дозволяє отримувати діагностичні моделі, які забезпечують більшу достовірність діагностування за рахунок найбільш повного використання інформації первинного опису об'єктів.

2.5. Запропоновано сімейство діагностичних моделей вентильно-реактивного двигуна на основі первинного опису у вигляді перетинів БВФ та вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД, що на відміну від існуючих моделей дозволяє підвищити достовірність та завадостійкість діагностування за рахунок одночасного урахування нелінійних і інерційних властивостей ОД. Встановлено, що діагональні перетини БВФ другого порядку представляють найбільшу діагностичну цінність і їх доцільно використовувати в якості джерела діагностичної інформації при побудові діагностичних моделей вентильно-реактивного двигуна.

2.6. Розроблено метод побудови інтегральних непараметричних динамічних моделей окорухового апарату людини у вигляді перехідної та двовимірної перехідної функцій на основі даних експериментів «вхід–вихід» з використанням тестових багатоступінчастих сигналів з подальшим виділенням парціальних складових з відгуків та визначенням на їх основі БПФ, що на відміну від існуючих методів дозволяє одночасно врахувати нелінійні і інерційні властивості ОД, підвищити точність моделювання та достовірність діагностування за допомогою отриманих моделей.

3. Удосконалено метод діагностування станів ріжучого інструменту на основі непрямих вимірювань шляхом використання тестових багатоступінчастих впливів на

систему різання у вигляді навантажень з ударами та реєстрації відгуків системи, за результатами яких будуються інформаційні моделі на основі БПФ в якості джерела первинної діагностичної інформації, що на відміну від існуючих методів дозволяє одночасно врахувати нелінійні і інерційні властивості ОД, підвищити достовірність діагностування за допомогою отриманих інформаційних моделей та оперативність отримання первинної діагностичної інформації про об'єкт.

**Практичне значення отриманих результатів** для галузі ІТ полягає в розробці обчислювальних алгоритмів методу ідентифікації інформаційних моделей на основі на основі БВФ та БПФ і побудови діагностичних моделей, що розширює клас важливих для практики проблем до задач діагностування неперервних об'єктів різної природи в умовах неповної апріорної інформації.

На основі зазначених алгоритмів розроблено ефективні інструментальні засоби web-орієнтованої АСТД «ІСІДА-WEB» (Інтегрована Система Інтелектуального Даних Аналізу), які інтегровано з хмарними сервісами для вирішення ресурсномістких задач діагностування, що забезпечує високу обчислювальну потужність та швидкість пошуку розв'язків в задачах ідентифікації і діагностування, а також, web-сервіси програмного доступу до функціоналу АСТД з боку зовнішніх програмних засобів.

З використанням цих засобів побудовано сучасні прикладні інформаційні системи (ІС):

- АСТД електродвигунів і прогнозування їх залишкового ресурсу, що дозволяє підвищити безпеку експлуатації електроустаткування при зниженні експлуатаційних витрат і екологічного навантаження шляхом підвищення достовірності діагностування. Система пройшла цільові випробування в ТОВ «Оліс» (м. Одеса), впроваджена в ТОВ «Нафтогазхім сервіс» (м. Одеса), де вона використовується для організації ресурсозберігаючої експлуатації технологічного обладнання. В результаті досліджень виявлено, що розроблена АСТД дозволяє подовжити інтервали часу між технічним обслуговуванням виробничого обладнання у порівнянні з обслуговуванням за плановим розкладом в середньому на 15-20%, підвищити достовірність діагностування станів електродвигунів на 10-15% у порівнянні з прямою оцінкою експлуатаційних параметрів.

- АСТД станів ріжучих інструментів за результатами використання тестових багатоступінчастих впливів, що дозволяє прогнозувати їх залишковий робочий ресурс. В результаті стендових випробувань на кафедрі технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства ОНПУ встановлено, що розроблена АСТД дозволяє підвищити достовірність діагностування станів ріжучих інструментів на 4–6% та оперативність діагностування в 1,5–3 рази у порівнянні з системою технічного зору, заснованою на прямих вимірюваннях геометричних параметрів зони зносу. Систему впроваджено в ПрАТ «Уманьферммаш» (м. Умань) та ТОВ «НВЦ «АВТЕХ» (м. Одеса).

- ІС ідентифікації окорухового апарату за допомогою відеореєстрації (eye-tracking), що дозволяє підвищити точність побудови нелінійних інерційних моделей окорухового апарату людини за експериментальними даними спостережень «вхід-вихід». Систему впроваджено в ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім.



В. П. Філатова НАМН України» (м. Одеса), де вона використовується при розробці нових методів медичної (офтальмологічної) діагностики і корекції зору.

– Web-орієнтований банк відеоданих у вигляді репозиторія відеофайлів та пов'язаних з ними описом тестового впливу та стану об'єкту, що дозволяє розробляти і тестувати нові моделі очорухового апарату та порівнювати їх точність з існуючими моделями на основі якісних експериментальних даних спостережень «вхід-вихід».

– ІС ідентифікації економічних процесів, що дозволяє підвищити точність побудови моделей нелінійних інерційних ОД за експериментальними даними спостережень «вхід-вихід». Систему впроваджено в ТОВ «Ревера Груп» (м. Одеса) та в ТОВ «Перша ріелторська компанія» (м. Одеса) для побудови моделей маркетингових заходів і рекламних кампаній в мережі інтернет на основі даних «вхід-вихід», отриманих за допомогою системи інтернет-статистики Google Analytics. В результаті досліджень встановлено, що розроблена ІС дозволяє отримувати адекватні моделі маркетингових заходів і рекламних кампаній в мережі інтернет в умовах неповної апріорної інформації, на відміну від статистичних моделей Google AdWords.

Результати роботи отримали втілення в навчальному процесі ОНПУ: дисципліни «Інтелектуальні системи», «Математичне моделювання технічних систем та технологічних процесів», «Моделювання процесів і систем», «Розпізнавання і класифікація в управлінні» на кафедрі комп'ютеризованих систем управління, дисципліна «Інтелектуальні методи досліджень в матеріалознавстві» на кафедрі матеріалознавства та технології матеріалів, а також в навчальному процесі ОНМА: дисципліни «Інформаційні радіосистеми», «Радіоелектронні системи» на кафедрі морського радіозв'язку; використовуються при розробці тем магістерських дипломних робіт і в дисертаційних дослідженнях аспірантів.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення, висновки і рекомендації, що містяться в дисертації та виносяться на захист, отримано здобувачем самостійно в період з 2005 по 2018 рр. і узагальнено при оформленні дисертації. Роботи [1, 2, 3, 4, 6, 52] виконано автором особисто. У статтях, написаних у співавторстві автору належать: розвиток методу [8, 18, 35, 47, 48] та базова інформаційна технологія [7, 10, 22, 23, 29, 37, 38, 54] діагностування нелінійних інерційних об'єктів на основі використання інформаційних моделей у вигляді БВФ; метод непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД на основі БПФ у часовій [11, 12] та БВФ у частотній [14, 44] областях; сімейство діагностичних моделей нелінійних інерційних ОД на основі спектральних перетворень [45, 49], вейвлет-перетворень [28, 31, 41], моментів БВФ [33, 36] та у вигляді об'єднання сукупностей ознак, отриманих на основі інформаційних моделей різних порядків [32], дослідження ефективності методів оцінки діагностичних ознак на основі штучних нейронних мереж [5, 26, 27, 30]; сімейство діагностичних моделей вентильно-реактивного двигуна у вигляді спектральних перетворень діагональних та піддіагональних перетинів БВФ [13, 34]; метод побудови інтегральних непараметричних динамічних моделей очорухового апарату людини на основі БПФ [9, 24, 25, 39, 40, 42]; створення АСТД станів ріжучих інструментів: математичне забезпечення процесу діагностування [20, 43], побудова простору діагностичних ознак [19, 50, 51], побудова діагностичних моделей [16, 17, 21, 46], розвиток методу діагностування станів ріжучого інструменту на основі тестових багатоступінчастих впливів на систему різання у вигляді навантажень з

ударами [15]; інформаційні моделі економічних процесів на основі даних «вхід-вихід» [53].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідалися та обговорювалися на Восьмій міжнародній науково-практичній конференції «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ-2007 (Одеса, 2007); Сьомій Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Одеса, 2007); VI науково-технічній конференції «Приладобудування – 2007: стан і перспективи» (Київ, 2007); 2nd International Conference on Inductive Modelling ICIM 2008 (Kyiv, 2008); 6th IEEE East-West Design & Test Symposium EWDTs'08 (Lviv, 2008); IEEE International Conference on «Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications» IDAACS-2009 (Rende, 2009), IDAACS-2015 (Warsaw, 2015), IDAACS-2017 (Bucharest, 2017); 15-й міжнародній науково-практичній конференції «Физические и компьютерные технологии» (Харків, 2009); Науково-технічній конференції «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережения» (Одеса, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Київ-Черкаси, 2015); Третій українсько-німецькій конференції «Інформатика. Культура. Техніка» ICT-2015 (Одеса, 2015); Міжнародній науковій конференції «Intellectual systems for decision making and problems of computational intelligence» ISDMCI-2015 (Kherson, 2015), ISDMCI-2018 (Kherson, 2018); 18-th International conference «System analysis and information technology» SAIT 2016 (Kyiv, 2016); 2013 AASRI Conference on «Intelligent Systems and Control» ISC 2013 (Vancouver, 2013); 9th International Conference on Computer Engineering and Applications «Advances in Information Science and Computer Engineering» CEA-2015 (Dubai, 2015); IEEE International Conference on «Automation Science and Engineering» CASE-2015 (Gothenburg, 2015); 20th International Conference «Methods and Models in Automation and Robotics» MMAR-2015 (Miedzyzdroje, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики і моделювання» ПІМ-2015 (Харків, 2015), ПІМ-2017 (Харків, 2017), ПІМ-2018 (Харків, 2018); Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації» (Кам'янець-Подільський, 2018).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертації викладено у 54 публікаціях, з них: 20 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук (у тому числі 12 статей у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз, 4 статті надруковані без співавторів), 1 стаття у зарубіжному науковому періодичному виданні з напрямку, з якого підготовлено дисертацію, 2 монографії, 28 публікацій у працях і матеріалах наукових конференцій, 6 робіт у журналах і збірниках наукових праць з міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація має загальний обсяг 337 сторінок і складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 8 додатків. Основний текст дисертації викладено на 270 сторінках. Робота містить 79 рисунків і 27 таблиць. Список використаних джерел становить 295 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача у роботи, виконані у співавторстві, апробацію результатів роботи, основні публікації за темою дисертації.

**Перший розділ** містить аналіз загальної проблеми створення ІТ видобування діагностичної інформації для вирішення науково-технічної проблеми підвищення достовірності та оперативності діагностування нелінійних інерційних об'єктів в сучасних АСТД.

Наведено огляд існуючих методів діагностування, виконано порівняльний аналіз моделей неперервних нелінійних інерційних ОД, на основі чого визначені та обґрунтовані основні етапи ТД та узагальнена структура АСТД нелінійних інерційних об'єктів, яку представлено на рис. 1. Тут  $x_c(t)$  та  $x(t)$  – зовнішній та скоригований управляючий вплив на об'єкт (вхідний сигнал),  $y(t)$  – відгук об'єкта (вихідний сигнал),  $f_a(t)$ ,  $f_o(t)$  та  $f_s(t)$  – завади з боку приводу, об'єкту та датчику відповідно.

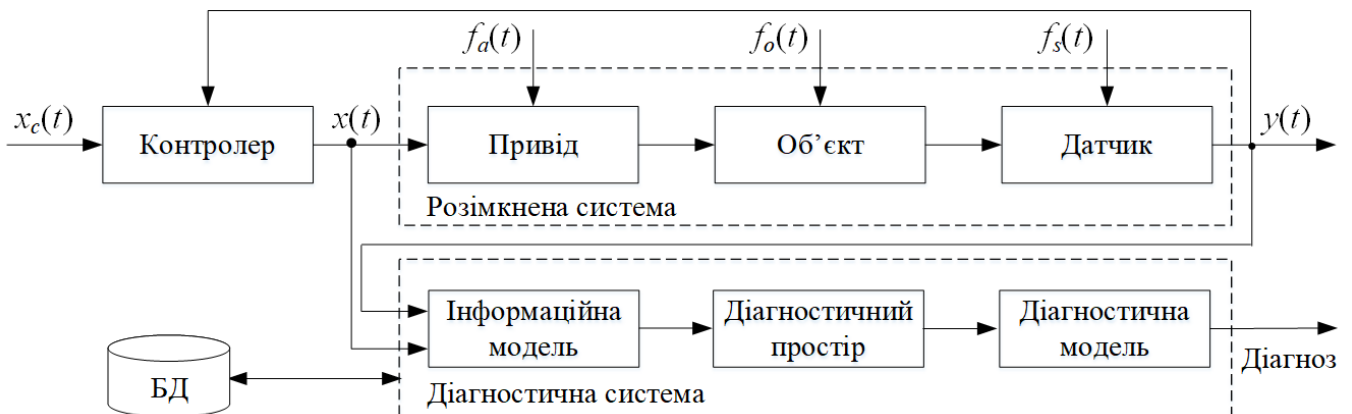


Рисунок 1. Узагальнена структура АСТД нелінійних інерційних об'єктів

Узагальнена структура АСТД відображає процес ТД, заснований на відновленні моделі ОД, в якому визначено ключові етапи перетворення діагностичної інформації: побудова інформаційної моделі, побудова діагностичного простору, побудова діагностичної моделі.

Вважається, що несправності змінюють тільки параметри інформаційної моделі об'єкта, які при діагностуванні оцінюються методами параметричної ідентифікації. Однак, часто дефекти призводять до зміни і структури моделі, що зумовлює застосування методів непараметричної ідентифікації для побудови інформаційної моделі ОД. Тому, доцільно використовувати в якості інформаційної моделі ОД інтегральні непараметричні динамічні моделі на основі БВФ, отримані за даними експерименту «вхід–вихід», які одночасно описують нелінійні та інерційні властивості ОД, що забезпечує високу достовірність діагностування.

Співвідношення «вхід-вихід» для нелінійного інерційного ОД з невідомою структурою (типу «чорний ящик») з одним входом і одним виходом у часовій області

у вигляді інтегральної моделі на основі БВФ має вигляд ряду:

$$y(t) = w_0 + \int_0^t w_1(\tau) x(t-\tau) d\tau + \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) x(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots = w_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t), \quad (1)$$

де  $x(t)$  і  $y(t)$  – вхідний і вихідний сигнали системи, відповідно;  $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$  – БВФ  $n$ -го порядку ( $n=1, 2, 3, \dots$ ), симетрична щодо дійсних змінних  $\tau_1, \dots, \tau_n$ ;  $y_n(t)$  – парціальна складова відгуку ( $n$ -вимірний інтеграл згортки);  $w_0(t)$  – вільний член ряду (при нульових початкових умовах  $w_0(t) \equiv 0$ );  $t$  – поточний час.

В загальному випадку, для опису ОД з багатьма входами і багатьма виходами у часовій області використовується багатовимірна послідовність БВФ:

$$y_j(t) = \sum_{i_1=1}^{\nu} \int_0^t w_{i_1}^{(j)}(\tau) x_{i_1}(t-\tau) d\tau + \sum_{i_1, i_2=1}^{\nu} \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2}^{(j)}(\tau_1, \tau_2) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \sum_{i_1, i_2, i_3=1}^{\nu} \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2 i_3}^{(j)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) x_{i_3}(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots, \quad (2)$$

де  $y_j(t)$  – відгук ОД на  $j$ -му виході у поточний момент часу  $t$  при нульових початкових умовах;  $x_1(t), \dots, x_{\nu}(t)$  – вхідні сигнали;  $w_{i_1 \dots i_n}^{(j)}(\tau_1, \dots, \tau_n)$  – БВФ  $n$ -го порядку по  $i_1, \dots, i_n$  входах та  $j$ -му виходу – симетричні функції відносно дійсних змінних  $\tau_1, \dots, \tau_n$ ;  $\nu, \mu$  – кількість входів і виходів ОД, відповідно.

Для опису ОД з багатьма входами і багатьма виходами у часовій області використовується багатовимірна послідовність БВФ:

Піддіагональні перетини БПФ  $n$ -го порядку  $\hat{h}_{i_1 \dots i_n}^j(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n)$  являють собою  $n$ -вимірні інтеграли від БВФ  $n$ -го порядку  $w_{i_1 \dots i_n}^j(\tau_1, \dots, \tau_n)$ :

$$h_{i_1 \dots i_n}^j(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} w_{i_1 \dots i_n}^j(t-\tau_1-\lambda_1, \dots, t-\tau_n-\lambda_n) d\lambda_1 \dots d\lambda_n. \quad (3)$$

Для випадку одновимірного ОД  $n$ -вимірні БПФ  $n$ -го порядку  $\hat{h}_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n)$  визначаються за виразом:

$$h_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} w_n(t-\tau_1-\lambda_1, \dots, t-\tau_n-\lambda_n) d\lambda_1 \dots d\lambda_n. \quad (4)$$

Для опису ОД з багатьма входами і багатьма виходами у частотній області використовується багатовимірне перетворення Фур'є для БВФ  $n$ -го порядку – багатовимірна передавальна функція:

$$W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = F_n \langle w_n(t_1, \dots, t_n) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} w_n(t_1, \dots, t_n) \exp\left(-j \sum_{i=1}^n \omega_i t_i\right) \prod_{i=1}^n dt_i, \quad (5)$$

де  $F_n \langle \rangle$  –  $n$ -вимірне перетворення Фур'є;  $j$  – уявна одиниця.

Ідентифікація ОД в частотній області зводиться до визначення на заданих частотах значень амплітуди і фази багатовимірної передавальної функції – багатовимірних амплітудно-частотної  $|W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)|$  і фазо-частотної  $\arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$  характеристик багатовимірного перетворення Фур'є БВФ  $n$ -го порядку:

$$|W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)| = \sqrt{\left[ \operatorname{Re} \left( W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \right) \right]^2 + \left[ \operatorname{Im} \left( W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \right) \right]^2}, \quad (6)$$

$$\arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \left( W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \right)}{\operatorname{Re} \left( W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \right)}, \quad (7)$$

де  $\operatorname{Re}$  і  $\operatorname{Im}$  – відповідно дійсна і уявна частини комплексної функції  $n$  змінних.

Побудова моделі нелінійного інерційного ОД у вигляді БВФ полягає у виборі виду тестових впливів  $x(t)$  і розробці алгоритму, який дозволяє за вимірними реакціями  $y(t)$  виділяти парціальні складові  $y_n(t)$  і визначати на їх основі БВФ  $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ ,  $n=1, 2, \dots$  або їх Фур'є-зображення  $W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$  –  $n$ -вимірні передавальні функції, відповідно для часової або частотної області.

Значний внесок у розвиток теоретичних основ та практичні застосування інтегральних непараметричних динамічних моделей та їх ідентифікації на основі спостережень внесли українські вчені: В.В. Васильєв, А.Ф. Верлань, В.К. Задірака, О.Г. Івахненко, Ю.Ю. Коляденко, Я.Н. Матвійчук, В.Д. Павленко, В.В. Поповський, О.А. Серков та зарубіжні вчені: Я.З. Цыпкин, Ю.С. Попков, О.Н. Киселев, Б.Л. Шмульян, Н.П. Петров, К.А. Пупков, В.И. Капалин, А.С. Ющенко, В.В. Солодовников, А.Н. Дмитриев, Н.Д. Егупов, В.В. Семенов, А.С. Апарцин, Д.М. Сидоров, С.В. Солодуша, А.І. Іванов, М.А. Щербаков, Л.В. Данилов, Е.Б. Соловьева, N. Wiener, H.L. Van Trees, M. Schetzen, J.F. Barrett, A.V. Balakrishnan, C. Desoer, L.O. Chua, W.J. Rugh, S.A. Billings, A. Borys, G.V. Giannakis та ін.

Проте, при використанні інтегральних непараметричних динамічних моделей в умовах практики виникають деякі труднощі. По-перше, для ряду ОД, наприклад, в часовій області – око-руховий апарат людини, – неприпустимим або шкідливим є використання тестових імпульсних вхідних сигналів для проведення експерименту «вхід–вихід»; в частотній області – канали зв'язку, де нелінійність вносять атмосферний шар і явища, що заважають проходженню сигналу, – використання відомих методів активної ідентифікації за допомогою тестових полігармонічних вхідних сигналів не забезпечує сучасні вимоги до точності отримуваних результатів обробки сигналів.

Тому необхідно застосовувати спеціальні прийоми виділення парціальних складових, БВФ або БПФ з відгуку ОД. Відомі способи такої декомпозиції не забезпечують достатньої точності оцінки парціальних складових, а, отже, це призводить до великих похибок при визначенні БВФ та БПФ на основі експериментальних даних. Для вирішення цього питання обґрунтована необхідність розробки методів непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД типу «чорний ящик» на основі БВФ та БПФ з використанням тестових ступінчастих та полігармонічних сигналів, що забезпечує належну точність оцінки парціальних складових, а, отже, БВФ та БПФ на основі експериментальних даних.

По-друге, великий обсяг первинної ідентифікаційної інформації (інформаційних моделей у вигляді БВФ та БПФ) призводить до зниження оперативності налаштування АСТД. Це обмежує використання таких систем в умовах адаптації до нових функціональних вимог, експлуатації у широкому діапазоні зовнішніх умов і обумовлює протиріччя між достовірністю ТД і оперативністю налаштування АСТД.

Для вирішення цього протиріччя обґрунтована необхідність використання вторинної ідентифікації – побудови діагностичних моделей  $d(\mathbf{x})$  в просторі вторинних ознак (діагностичному просторі)  $\mathbf{x}: \{w_n(t_1, \dots, t_n)\}_{n=1,2,\dots,N} \Rightarrow \mathbf{x}=(x_1, \dots, x_k)'$ , де  $N$  – порядок інформаційної моделі,  $k$  – розмірність діагностичної моделі, штрих – транспонування вектору.

Значний внесок у розвиток сучасної теорії цифрової обробки сигналів і її практичні застосування внесли Т.К. Вінцюк, В.І. Дубровін, В.А. Ковалевський, С.В. Ленков, А.І. Поворознюк, І.В. Сергієнко, С.О. Субботін, Л.С. Файнзільберг, М.І. Шлезінгер та інші фахівці.

Однак, задача переходу від інформаційних до діагностичних моделей (стиснення діагностичної інформації) в загальному випадку не вирішена і вимагає нових ефективних методів.

Зазвичай, методи редукції моделей базуються на ортогональних перетвореннях для послаблення статистичних зв'язків між параметрами моделей та підвищення діагностичної цінності цих параметрів. Визначено основний недолік поширених методів редукції моделей, заснованих на інформаційному та компонентному аналізі – потреба достатнього об'єму апріорних даних про ОД, отже, орієнтація на роботу у визначених режимах функціонування та діапазонах зовнішніх умов. Розширення сфери практичних застосувань, адаптація до нових функціональних вимог, експлуатації у широкому діапазоні зовнішніх умов призводить до зростання апріорної невизначеності даних про об'єкт, а отже, до зниження достовірності та завадостійкості діагностування.

Встановлено, що для усунення зазначеного недоліку необхідно розробити новий підхід до побудови діагностичних моделей на основі вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД. Використання такого підходу дозволяє одночасно забезпечити високу достовірність діагностування ОД завдяки сімейству спектральних перетворень інформаційних моделей на основі перетворень Фур'є, Карунена-Лоєва, вейвлет-перетворень та моментів для формування просторів діагностичних ознак та підвищити завадостійкість достовірності діагностування за рахунок застосування діагностичних моделей на основі статистичних методів машинного навчання.

Вирішенню означених проблем присвячено наступні розділи.

У **другому розділі** розроблено методи непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД типу «чорний ящик» на основі БПФ у часовій та БВФ у частотній областях, отриманих за даними експерименту «вхід–вихід» за допомогою вхідних ступінчастих та полігармонічних тестових впливів відповідно.

Для розв'язання проблеми використання тестових імпульсних вхідних сигналів в умовах практики при проведенні експерименту «вхід–вихід» сформульовано та доведено наступні твердження.

*Твердження 1.* Нехай тестові впливи являють собою суму  $k$  ступінчастих сигналів  $x_k(t)=a\theta(t-\tau_k)$  з амплітудою  $a$  і зі зсувом у часі  $t$  на  $\tau_1, \dots, \tau_k$  ( $\tau_k \geq 0$ ), де  $k=1, 2, \dots, n$ ,  $\theta(t)$  – функція Хевісайда. Тоді, для ОД з одним входом і одним виходом оцінка перетину перехідної функції  $n$ -го порядку:

$$\hat{h}_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = \frac{1}{n! a^n} \sum_{\delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}=0}^1 (-1)^{n+\sum_{k=1}^n \delta_{\tau_k}} y(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n}), \quad (8)$$

де  $y(t, \delta_{\tau_1}, \dots, \delta_{\tau_n})$  – відгук ОД в момент часу  $t$  при дії на його вході багатоступінчастого сигналу, причому, якщо  $\delta_{\tau_k}=1$ , то тестовий вплив містить ступінчастий сигнал зі зсувом на  $\tau_k$ , у протилежному випадку, при  $\delta_{\tau_k}=0$  – ступінчастий сигнал відсутній.

*Твердження 2.* Нехай тестові впливи являють собою комбінацію  $k$  ступінчастих сигналів  $x_{i_k}(t)=a_{i_k}\theta(t-\tau_k)$  зі зсувом у часі  $t$  на  $\tau_1, \dots, \tau_k$ , ( $\tau_k \geq 0$ ), де  $k=1, 2, \dots, n$ , які діють на входах  $i_1, \dots, i_n$  з амплітудами  $a_{i_k}$  ( $i_k=1, 2, \dots, \nu$ ). Тоді, для ОД з  $\nu$  входами і  $\mu$  виходами, оцінка перетину перехідної функції  $n$ -го порядку:

$$\hat{h}_{i_1 \dots i_n}^j(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n) = \frac{1}{n! \prod_{k=1}^n a_{i_k}} \sum_{\delta_{\tau_1}^{i_1}, \dots, \delta_{\tau_n}^{i_n}=0}^1 (-1)^{n+\sum_{k=1}^n \delta_{\tau_k}^{i_k}} y_j(t, \delta_{\tau_1}^{i_1}, \dots, \delta_{\tau_n}^{i_n}), \quad (9)$$

де  $y_j(t, \delta_{\tau_1}^{i_1}, \dots, \delta_{\tau_n}^{i_n})$  – відгук ОД на  $j$ -му виході ( $j=1, \dots, \mu$ ) в момент часу  $t$  при дії багатоступінчастих сигналів, причому, якщо  $\delta_{\tau_k}^{i_k}=1$ , то тестовий вплив на  $i_k$ -му вході містить ступінчастий сигнал зі зсувом на  $\tau_k$ , в іншому випадку, при  $\delta_{\tau_k}^{i_k}=0$  – ступінчастий сигнал відсутній.

На базі розглянутих тверджень розроблено метод непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД на основі БПФ з використанням тестових ступінчастих сигналів у часовій області, який винесено на захист як п.2.2 наукової новизни. Метод реалізується в наведеній нижче послідовності.

*Крок 1.* На вхід ОД подається тестовий сигнал  $x(t)$ , який являє собою одиничну функцію  $\theta(t)$ . Результатом ідентифікації є перехідна функція першого порядку  $\hat{h}_1(t)$ .

*Крок 2.* Для визначення піддіагональних перетинів перехідних функцій  $n$ -го порядку  $\hat{h}_n(t, \dots, t)$  ( $n \geq 2$ ) ОД випробовується за допомогою  $n$  тестових ступінчастих сигналів  $a\theta(t-\tau_i)$  з заданими амплітудою  $a$  і різними зсувами за часом  $\tau_i$ . Структурні схеми процедури ідентифікації БПФ другого та третього порядку наведені на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

*Крок 3.* За співвідношенням (8) для ОД з одним входом і одним виходом або (9) для ОД з багатьма входами і багатьма виходами визначаються піддіагональні перетини перехідних функцій  $n$ -го порядку ( $n \geq 2$ ) на основі даних експериментальних досліджень «вхід-вихід».

На основі методу непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД у вигляді БПФ з використанням тестових ступінчастих сигналів розроблено обчислювальні методи для ОД з одним входом та одним виходом, а також для ОД з двома входами та двома виходами.

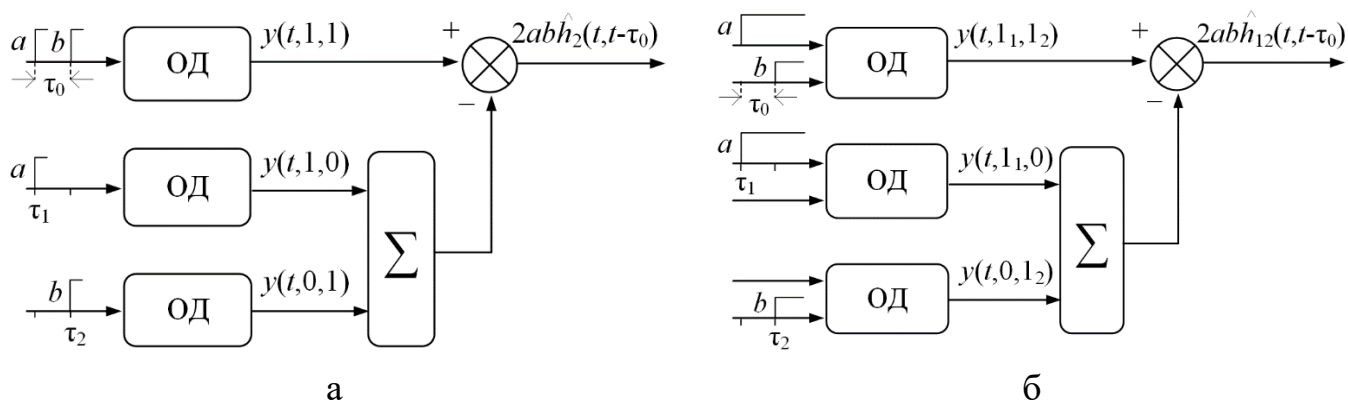


Рисунок 2. Структурна схема ідентифікації БПФ другого порядку: а – ОД з одним входом і одним виходом, б – для ОД з двома входами і одним виходом

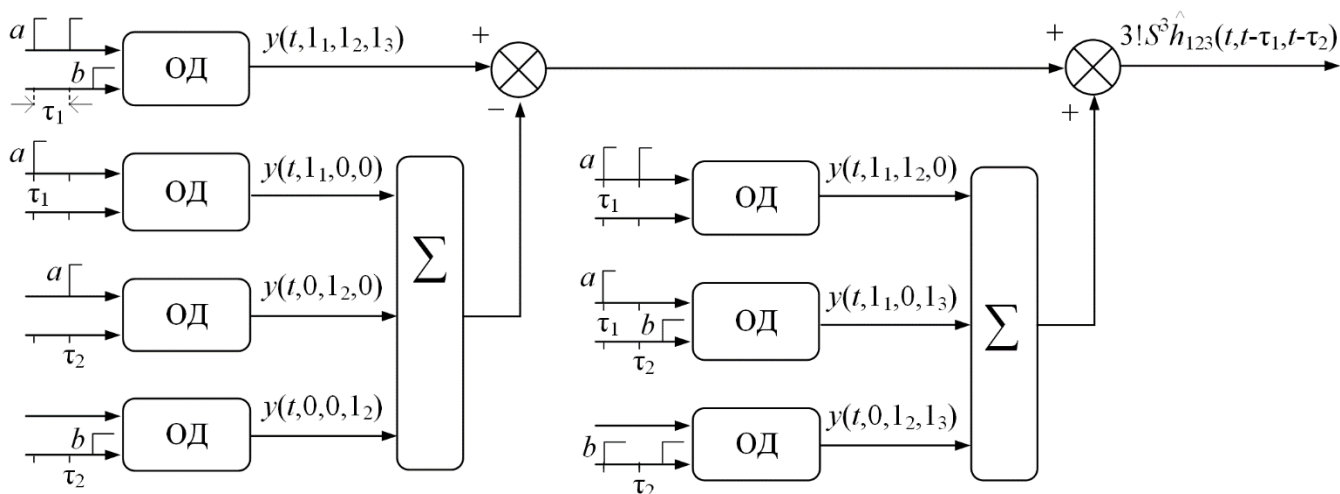


Рисунок 3. Структурна схема ідентифікації БПФ третього порядку для ОД з двома входами і одним виходом

*Обчислювальний метод непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД з одним входом та одним виходом.*

*Крок 1.* На вхід ОД подаються тестові сигнали  $x_1(t) = a\theta(t)$  та  $x_2(t) = 2a\theta(t)$  і вимірюються відповідні відгуки ОД  $y_1(t)$  і  $y_2(t)$ .

*Крок 2.* Визначаються перехідна функція першого порядку  $\hat{h}_1(t)$ , та діагональний перетин перехідної функції другого порядку  $\hat{h}_2(t, t)$ :

$$\hat{h}_1(t) \cong \frac{y_1(t)}{a}, \quad \hat{h}_2(t, t) \cong \frac{y_2(t) - 2y_1(t)}{2a^2}. \quad (10)$$

*Крок 3.* Відгуки моделі на основі перехідних характеристик першого і другого порядку наближено описується за допомогою виразу:

$$\hat{y}(t) = a\hat{h}_1(t) + 2a^2\hat{h}_2(t, t). \quad (11)$$

*Обчислювальний метод непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД з двома входами та двома виходами.*

*Крок 1.* На вхід ОД подаються тестові сигнали  $\{x_1 = a\theta(t), x_2 = 0\}$  та  $\{x_1 = 2a\theta(t), x_2 = 0\}$  і вимірюються відповідні відгуки по першому входу ОД  $y_a^{(1)}(t)$  і  $y_{2a}^{(1)}(t)$ . Аналогічно вимірюються відгуки  $y_b^{(2)}(t)$  і  $y_{2b}^{(2)}(t)$  по другому входу ОД на вхідні тестові сигнали  $\{x_1 = 0, x_2 = b\theta(t)\}$  і  $\{x_1 = 0, x_2 = 2b\theta(t)\}$ .



Крок 2. Визначаються перехідні функції першого порядку по першому входу  $\hat{h}_1^{(1)}(t)$  та другому входу  $\hat{h}_2^{(2)}(t)$ :

$$\hat{h}_1^{(1)}(t) = \frac{y_1^{(1)}(t)}{a}, \quad \hat{h}_2^{(2)}(t) = \frac{y_2^{(2)}(t)}{b}. \quad (12)$$

Крок 3. Визначаються перехідні функції другого порядку по першому входу  $\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t)$  та по другому входу  $\hat{h}_{22}^{(2)}(t,t)$ :

$$\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t) = \frac{y_{2a}^{(1)}(t) - 2y_a^{(1)}(t)}{2a^2}, \quad \hat{h}_{22}^{(2)}(t,t) = \frac{y_{2b}^{(2)}(t) - 2y_b^{(2)}(t)}{2b^2}. \quad (13)$$

Крок 4. Перехідна функція другого порядку по першому і другому входам  $\hat{h}_{12}^{(j)}(t,t)$  під дією вхідних впливів  $\{x_1=a\theta(t), x_2=b\theta(t)\}$ ,  $\{x_1=a\theta(t), x_2\equiv 0\}$  і  $\{x_1\equiv 0, x_2=b\theta(t)\}$ :

$$\hat{h}_{12}^{(j)}(t,t) = \frac{y_{ab}^{(j)}(t) - y_a^{(j)}(t) - y_b^{(j)}(t)}{2ab}, \quad j=1,2. \quad (14)$$

Крок 5. Відгуки моделі на основі перехідних характеристик першого і другого порядку за двома входами і двома виходами наближено описується за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} \hat{y}_1(t) &= a\hat{h}_1^{(1)}(t) + a^2\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t) + ab\hat{h}_{12}^{(1)}(t,t), \\ \hat{y}_2(t) &= b\hat{h}_2^{(2)}(t) + 2b^2\hat{h}_{22}^{(2)}(t,t) + ab\hat{h}_{12}^{(2)}(t,t). \end{aligned} \quad (15)$$

Для розв'язання проблеми підвищення точності методів ідентифікації за допомогою тестових полігармонічних вхідних сигналів в умовах практики, коли нелінійність вносять явища, що заважають проходженню сигналу розроблено інтерполяційний метод ідентифікації нелінійних інерційних ОД.

В даному методі для поділу відгуку ОД на парціальні складові  $\hat{y}_n(t)$  використовується  $n$ -кратне диференціювання вихідного сигналу по параметру  $a$  – амплітуді тестових впливів. Метод реалізується в наведеній нижче послідовності.

Крок 1. На вхід ОД подається тестовий сигнал виду  $ax(t)$ , де  $x(t)$  – довільна функція;  $|a| \leq 1$  – масштабуючий коефіцієнт.

Крок 2. Виділення парціальної складової  $n$ -го порядку  $\hat{y}_n(t)$  з вимірюваного відгуку ОД  $y[ax(t)]$  за допомогою  $n$ -ої частинної похідної відгуку за амплітудою  $a$  при  $a = 0$  за виразом:

$$n! \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \underset{n \text{ разів}}{w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)} \prod_{k=1}^n x(t-\tau_k) d\tau_k = y_a^{(n)}[ax(t)]_{a=0}. \quad (16)$$

Для обчислення цього виразу частинна похідна замінюється виразом в кінцевих різницях. Використовується універсальний прийом, що дозволяє замінити похідну будь-якого порядку  $n$ , різницею співвідношенням так, щоб похибка від такої заміни для функції  $y[ax(t)]$  була будь-якого заздалегідь визначеного порядку апроксимації  $p$  щодо кроку  $h = \Delta a$  різницева сітка по амплітуді  $a$ . На основі рівності

$$y_a^{(n)}[ax(t)]_{a=0} = \frac{1}{h^n} \sum_{r=-r_1}^{r_2} c_r y(a+rh) + O(h^p) \quad \text{для } \forall t \geq 0 \quad (17)$$

методом невизначених коефіцієнтів підбираються незалежні від  $h$  коефіцієнти  $c_r$ ,  $r = -r_1, -r_1+1, \dots, r_2$ , так, щоб рівність (17) виявилася справедливою. Межі підсумовування

$r_1 \geq 0$  і  $r_2 \geq 0$  можна взяти довільними, але так, щоб порядок  $r_1 + r_2$  різницевої відносини  $h^{-n} \sum c_r y(a + rh)$  задовольняв нерівності  $r_1 + r_2 \geq n + p - 1$ .

Для визначення  $c_r$  вирішується система рівнянь (17).

Структурну схему ідентифікації нелінійних інерційних ОД в частотній області наведено на рис. 4.

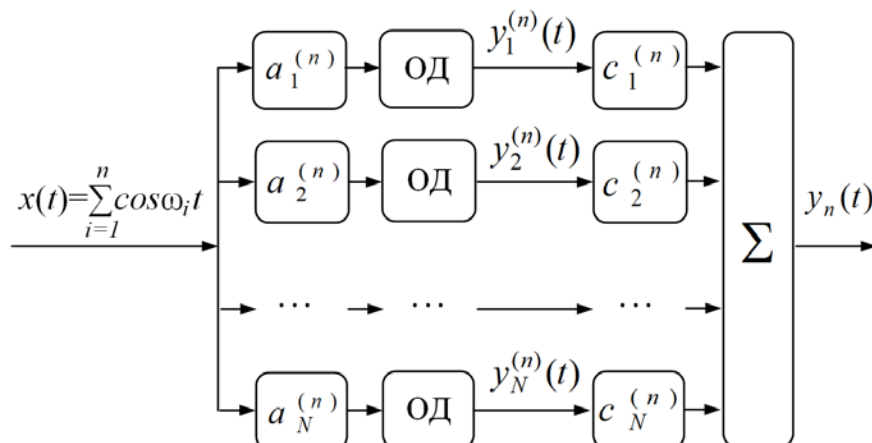


Рисунок 4. Структурна схема ідентифікації нелінійних інерційних ОД в частотній області

Для оцінки точності відновлених інформаційних моделей використовується критерій мінімуму середньоквадратичної помилки:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (f_i(t) - \hat{f}_i(t))^2} \quad (18)$$

або критерій процентної нормованої середньоквадратичної помилки:

$$\varepsilon_n = 100\% \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (f_i(t) - \hat{f}_i(t))^2}{\sum_{i=1}^k f_i(t)^2}}, \quad (19)$$

де  $k$  – кількість відліків на інтервалі часу спостереження,  $f_i$  – еталонні значення функції,  $\hat{f}_i(t)$  – значення оцінки функції, які отримано в результаті обробки експериментальних даних (відгуків системи) в дискретні моменти часу  $i$ , при використанні БВФ  $f_i(t) = w_i(t)$ , при використанні БПФ  $f_i(t) = h_i(t)$ .

Дослідження методу непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД на основі БПФ з використанням тестових ступінчастих сигналів проведено в розділі 6 при побудові інформаційної моделі око-рухового апарату людини (ОД з двома входами та двома виходами) та при побудові інформаційної моделі в застосуваннях цифрового маркетингу (ОД з одним входом та одним виходом). Отримані результати доводять переваги методу: зменшення об'єму обчислень та підвищення точності моделювання ОД.

У **третьому розділі** запропоновано сімейство діагностичних моделей нелінійних інерційних ОД, які будуються у просторі діагностичних ознак, отриманих на основі спектральних перетворень інформаційних моделей.

Побудова простору діагностичних ознак пов'язана з вирішенням задачі параметризації БВФ вихідних сигналів та стиснення параметрів.

При параметризації БВФ вихідних сигналів  $w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$  представляється вектором  $\mathbf{x}_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})'$ . Діагностичні ознак можуть бути отримані за допомогою

попереднього перетворення  $\mathbf{T}_j: Z[a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ , ( $j=1, \dots, n$ ):  $x_{jk} = \mathbf{T}_j(w_k(\tau_1, \dots, \tau_k))$ ; де  $Z[a, b]$  – простір дійсних безперервних функцій, заданих на відрізку  $[a, b]$ ;  $a, b$  – деякі дійсні числа. В якості оператора  $\mathbf{T}_j$  можуть застосовуватися ортогональні розкладання і інтегральні перетворювання БВФ в вектори коефіцієнтів базисних функцій. У найпростішому випадку оператор  $\mathbf{T}_j$  є оператором дискретизації  $x_{jk} = w_k(t_j, \dots, t_j)$ ,  $t_j = j\Delta t$ , де  $\Delta t$  – крок дискретизації.

В якості параметрів БВФ вихідних сигналів використовується сімейство *часових характеристик* ( $\mathbf{V}_k$ ) – вибірки відліків діагональних перетинів БВФ  $w_k(t-\tau_1, \dots, t-\tau_k)$  інформаційних моделей (1) або (2) порядку  $k=1, \dots, n$  із заданою дискретністю.

Стиснення параметрів полягає в знаходженні оптимального, в деякому сенсі, перетворення  $\mathbf{A}$  вихідного простору векторів вимірювань  $\mathbf{X}$  розмірністю  $n$  у просторі зображень меншої розмірності  $\mathbf{Y}$  (розмірністю  $m < n$ ). В цьому випадку нові ознаки виявляються відірваними від конкретного фізичного змісту і мають тільки абстрактне інформаційне значення.

В якості перетворень на рівні стиснення інформаційних моделей запропоновано сімейства діагностичних ознак на базі спектральних перетворень: частотні характеристики, коефіцієнти ортогонального розкладання Карунена-Лоева, коефіцієнти вейвлет-перетворень та моменти БВФ.

*Частотні характеристики* ( $\mathbf{A}\mathbf{F}_k$ ) і ( $\mathbf{P}\mathbf{F}_k$ ) – вибірки відліків амплітудно-частотної  $A_k(\omega_1, \dots, \omega_k)$  та фазо-частотної  $\varphi_k(\omega_1, \dots, \omega_k)$  характеристик перетинів БВФ  $w_k(t-\tau_1, \dots, t-\tau_k)$  порядку  $k$  інформаційних моделей (6) та (7) відповідно:  $x_{2j-1} = A_k(\omega_1, \dots, \omega_j)$ ,  $x_{2j} = \varphi_k(\omega_1, \dots, \omega_j)$ ,  $\omega_j = j\Delta\omega$ ,  $j=1, \dots, n$ .

*Коефіцієнти розкладання Карунена-Лоева* ( $\mathbf{K}\mathbf{L}_k$ ):  $c_1, \dots, c_m$  для перетинів БВФ  $w_k(t-\tau_1, \dots, t-\tau_k)$  порядку  $k$ , що визначаються за формулою:

$$\mathbf{c}_{ki} = \mathbf{\Phi}' \mathbf{x}_{ki}, \quad (20)$$

де  $\mathbf{c}_i = (c_{i1}, \dots, c_{im})'$  – вектор-стовпчик коефіцієнтів розкладання Карунена-Лоева для  $i$ -го класу ( $i=1, \dots, M$ );  $\mathbf{x}$  – вектор вихідних ознак  $i$ -го класу розмірністю  $n$ ;  $\mathbf{\Phi} = (\varphi_1, \dots, \varphi_m)$  – матриця перетворення розмірністю  $n \times m$  ( $m < n$ ), стовпчиками якої обираються  $m$  нормованих власних векторів  $\varphi_1, \dots, \varphi_m$ , відповідних найбільшим характеристичним числам кореляційної матриці  $\mathbf{R} = \sum_{i=1}^M p(\omega_i) \mathbf{E}\{\mathbf{x}_i \mathbf{x}_i'\}$ , де  $p(\omega_i)$  – апіорна імовірність появи  $i$ -го класу  $\omega_i$ , а  $\mathbf{E}\{\mathbf{x}_i \mathbf{x}_i'\}$  – оператор математичного очікування, який обчислюється за всіма спостереженнями, що належать до  $i$ -го класу.

*Коефіцієнти вейвлет-перетворень* ( $\mathbf{W}_k$ ) перетинів БВФ  $w_k(t-\tau_1, \dots, t-\tau_k)$  порядку  $k$ :

$$C(a, b) = \int_0^{\infty} w_k(t-\tau_1, \dots, t-\tau_k) a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (21)$$

де  $\psi(t)$  – функція перетворення (материнський вейвлет);  $a$  і  $b$  – відповідно параметри масштабу і зсуву вейвлета.

Для вибору вейвлета  $\psi(t)$ , що забезпечує найкраще відновлення сигналу, проведений ряд чисельних експериментів по перетворенню і реконструкції аперіодичних і коливальних сигналів з використанням вейвлетів *bior*, *coiflet*, *dobechi*, *haar*, *symlet*. Найменші помилки при відновленні досліджуваних сигналів

досягаються з використанням вейвлета *coiflet* порядку 4, який обрано у якості базового при стискуванні діагностичних моделей.

Моменти  $\mu_r^k$  ( $\mathbf{M}_k$ ) порядку  $r$  БВФ порядку  $k$ :

$$\mu_{i\dots l}^{(k)} = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \tau_1^i \dots \tau_k^l w_k(\tau_1, \dots, \tau_k) d\tau_1 \dots d\tau_k, \quad (22)$$

де  $i, \dots, l = 0, 1, \dots; i + \dots + l = r$  – порядок БВФ.

Моменти перетинів БВФ  $w_k(t - \tau_1, \dots, t - \tau_k)$  визначаються за формулою:

$$\mu_r^{(k)} = \int_0^\infty t^r w_k(t - \tau_1, \dots, t - \tau_{k-1}, t) dt. \quad (23)$$

Моменти діагональних перетинів БВФ визначаються за формулою:

$$\mu_r^{(k)} = \int_0^\infty t^r w_k(t, \dots, t) dt. \quad (24)$$

Формули (20), (21), (23) визначають сімейства просторів діагностичних ознак, отримані на основі спектральних перетворень БВФ. Сімейства діагностичних моделей  $d_i(\mathbf{x}_i)$ , які будуються на основі отриманих просторів діагностичних ознак, винесено на захист як п.2.3 наукової новизни.

Для підвищення достовірності діагностування та її завадостійкості запропоновано сімейство діагностичних моделей в просторах, які об'єднують діагностичні ознаки, отримані на основі БВФ різних порядків, що винесено на захист як п.2.4 наукової новизни:

– *часові характеристики* ( $\mathbf{V}_{1, \dots, n}$ ) на основі вибірки відліків БВФ першого порядку ( $\mathbf{V}_1$ ) і діагональних перетинів БВФ вищих порядків ( $\mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n$ ):  $\mathbf{V}_{1, \dots, n} = \mathbf{V}_1 \cup \dots \cup \mathbf{V}_n$ ;  $x_i = w_1(t_i)$ ,  $x_{i+1} = w_2(t_i, t_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

– *коефіцієнти розкладання Карунена-Лоєва* ( $\mathbf{KL}_{1, \dots, n}$ ) на основі розкладання Карунена-Лоєва БВФ першого порядку ( $\mathbf{KL}_1$ ) і діагональних перетинів БВФ вищих порядків ( $\mathbf{KL}_2, \dots, \mathbf{KL}_n$ ):  $\mathbf{KL}_{1, \dots, n} = \mathbf{KL}_1 \cup \dots \cup \mathbf{KL}_n$ ;  $x_i = c_{1i}$ ,  $x_{i+1} = c_{2i}$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

– *коефіцієнти вейвлет-перетворень* ( $\mathbf{W}_{1, \dots, n}$ ) на основі вейвлет-перетворень БВФ першого порядку ( $\mathbf{W}_1$ ) і діагональних перетинів БВФ вищих порядків ( $\mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_n$ ):  $\mathbf{W}_{1, \dots, n} = \mathbf{W}_1 \cup \dots \cup \mathbf{W}_n$ ;  $x_i = c_{1i}$ ,  $x_{i+1} = c_{2i}$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

– *моменти* ( $\mathbf{M}_{1, \dots, n}$ ) на основі моментів БВФ першого порядку ( $\mathbf{M}_1$ ) і діагональних перетинів БВФ вищих порядків ( $\mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n$ ):  $\mathbf{M}_{1, \dots, n} = \mathbf{M}_1 \cup \dots \cup \mathbf{M}_n$ ;  $x_{r+1} = \mu_r^{(1)}$ ,  $x_{r+4} = \mu_r^{(2)}$ ,  $r = \overline{0, 3}$ .

Діагностична модель  $d(\mathbf{x})$  будується з використанням статистичних методів машинного навчання. Зокрема, при відомих законах розподілу ознак застосовується метод максимальної правдоподібності, в інших випадках – метод стохастичної апроксимації.

Дослідження сімейства діагностичних моделей у вигляді спектральних перетворень перетинів БВФ та їх сукупностей, отриманих на основі інформаційних моделей різних порядків проведено в розділі 6 при побудові діагностичної моделі вентильно-реактивного двигуна. Отримані результати доводять переваги методу:

суттєве зменшення розмірності діагностичних моделей у порівнянні з інформаційними моделями та підвищення достовірності діагностування в умовах завад.

Оцінка діагностичної цінності моделей, отриманих на основі БВФ, визначається на основі критерію середнього ризику  $R$  (середньої вартості втрат при прийнятті рішень), який обчислюється для побудованої моделі в обраному просторі діагностичних ознак:

$$R = \sum_{i=1}^m \delta_i s_i p(\Omega_i), \quad (25)$$

де  $\delta_i = L_i/N_i$  – помилки класифікації,  $L_i$  – кількість об'єктів  $i$ -го класу, помилково віднесених до іншого класу  $k$  ( $k \neq i$ );  $N_i$  – кількість елементів  $i$ -го класу в екзаменаційній вибірці;  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $m$  – кількість класів стану ОД,  $s_i$  – вартості помилок  $\delta_i$ ,  $p(\Omega_i) = N_i / \sum_{j=1}^m N_j$  – апіорна імовірність появи об'єктів із класу  $\Omega_i$ .

При виборі двійкової функції вартості помилок (0 – правильне рішення, 1 – помилка) за умови нормального розподілу ознак в класах і однакових коваріаційних матриць оцінка діагностичної цінності моделей визначається за критерієм максимальної імовірності правильного розпізнавання  $P$ :

$$P = \sum_{i=1}^m L_i \cdot \left( \sum_{i=1}^m N_i \right)^{-1}. \quad (26)$$

**Четвертий розділ** присвячено синтезу базової ІТ вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в АСТД.

На основі методу непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД для побудови інформаційних моделей, розробленого в розділі 2, та діагностичних моделей, побудованих на основі вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД, які запропоновано в розділі 3, отримав подальший розвиток метод діагностування нелінійних інерційних об'єктів, який виноситься на захист як п.1 наукової новизни. Метод реалізується в наведеній нижче послідовності:

*Крок 1.* Встановлення:  $R_0$  – показник достовірності, який визначається вимогами до АСТД;  $N$  – початковий порядок моделі.

*Крок 2.* Формування тестових імпульсних  $x_k(t) = k\alpha\delta(t)$  або ступінчастих  $x_k(t) = k\alpha\theta(t)$  вхідних впливів на ОД в залежності від природи об'єкту ( $k=1, 2, \dots, N$  – кількість імпульсів або сходинок з амплітудою, кратною  $\alpha$ ).

*Крок 3.* Реєстрація відгуків ОД  $y_k(t)$  на вхідні впливи  $x_k$ .

*Крок 4.* Побудова інформаційної моделі ОД у вигляді БВФ  $w_{i_1 \dots i_n}^j(\tau_1, \dots, \tau_n)$  за виразом (2) або у вигляді БПФ  $h_{i_1 \dots i_n}^j(\tau_1, \dots, \tau_n)$  за виразом (3) на основі відгуків  $y_k(t)$ .

*Крок 5.* Побудова сімейства діагностичних моделей на основі вторинної спектрально-статистичної ідентифікації перетинів БВФ.

*Крок 6.* Інформаційна оптимізація діагностичної моделі  $d(x)$  з використанням сукупностей ознак для різних порядків інформаційної моделі.

*Крок 7.* Оцінка достовірності діагностичної моделі ОД. Якщо виконується умова  $R \leq R_0$ , де  $R$  – середній ризик, який обчислюється за виразом (25), пошук закінчується, інакше  $N=N+1$  та перехід до кроку 4.

Дослідження методу діагностування нелінійних інерційних об'єктів проведено в розділі 6 при побудові діагностичної моделі вентильно-реактивного двигуна. Отримані результати доводять переваги методу: підвищення достовірності діагностування та оперативності налаштування АСТД в умовах дій завод.

При практичній реалізації методу наступні недоліки ускладнюють процедуру налаштування АСТД на робочий режим:

- від початку невідомим є порядок інформаційної моделі ОД, який задовольняє вимогам до достовірності діагностування;
- не визначена єдина процедура направлено перебору моделей при інформаційній оптимізації діагностичної моделі з використанням сукупностей ознак для різних порядків інформаційної моделі.

Значна частина сучасних АСТД реалізує процедуру налаштування на робочий режим за принципами каскадної моделі, коли система переходить від одного етапу перетворення діагностичної інформації до наступного строго послідовно, без повернення до попередніх етапів, перекриття етапів. Недоліком цієї моделі є недостатня гнучкість процесу налаштування, низка оперативність внаслідок верифікації отриманих моделей на останньому етапі.

Протилежна ітеративна модель налаштування АСТД передбачає функціонування паралельно з неперервним аналізом отриманих результатів та коригуванням попередніх етапів процесу. Така модель позбавлена недоліків попередньої, але її недолік – низка оперативність в наслідок ітераційності процесу.

Для подолання означених недоліків методу діагностування нелінійних інерційних об'єктів, а також, підвищення оперативності діагностичної процедури запропонована V-модель налаштування системи ТД (рис. 5), яку винесено на захист, як п.2.1 наукової новизни.

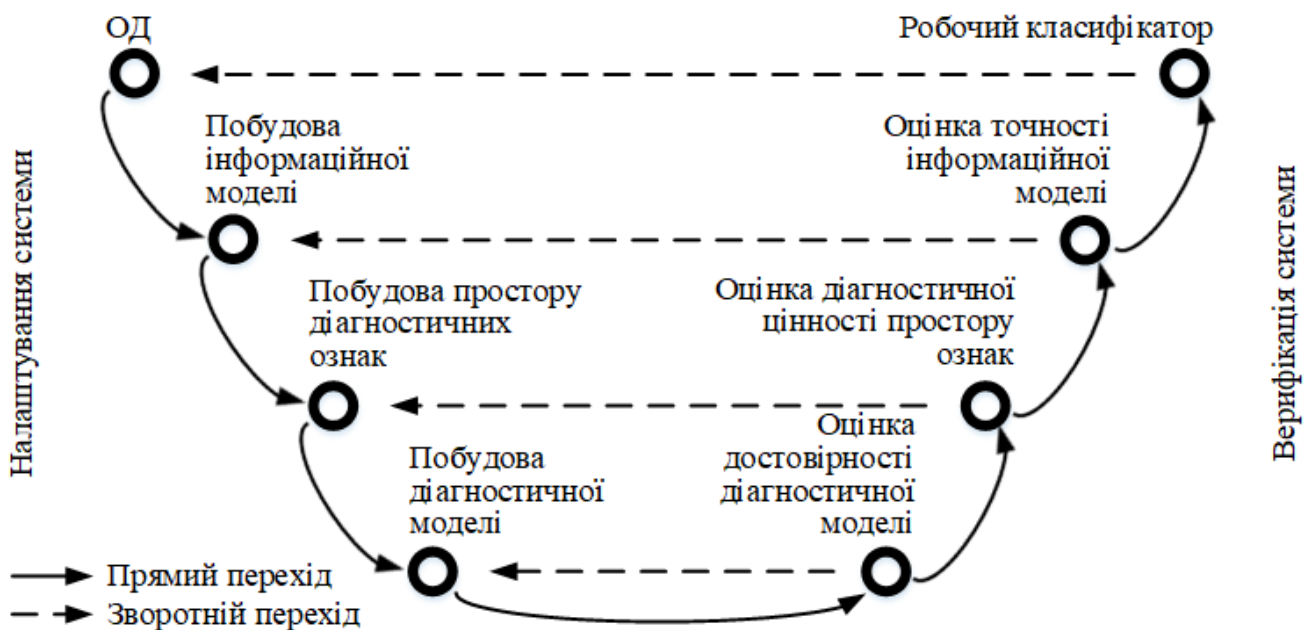


Рисунок 5. V-модель налаштування системи ТД

Згідно з цією моделлю процес налаштування системи ТД представлено низхідною послідовністю етапів побудови інформаційної моделі, простору діагностичних ознак та діагностичної моделі, процес верифікації представлено зворотною послідовністю етапів оцінки достовірності діагностичної моделі, оцінки діагностичної цінності простору ознак, оцінки точності інформаційної моделі, а ітерації налаштування системи виконуються між відповідними етапами обох напрямів. Відповідність етапів налаштування та верифікації показано пунктирними лініями.

Така модель дозволяє скоротити кількість глобальних циклів процесу налаштування АСТД за рахунок збільшення локальних циклів, що забезпечує можливість здійснювати перевірку проміжних результатів налаштування АСТД і виявляти відхилення від заданих параметрів якості АСТД на ранніх стадіях ітераційної процедури налаштування та прискорити підбір моделі з найбільшою діагностичною цінністю.

На основі розвинутого методу діагностування нелінійних інерційних об'єктів та запропонованої V-моделі налаштування АСТД розроблена базова ІТ вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД в системах АСТД (рис. 6).

На *етапі 1* для побудови інформаційної моделі ОД у вигляді БПФ або БПФ  $f_n(t-\tau_1, \dots, t-\tau_n)$  використовується метод непараметричної ідентифікації ОД з використанням тестових багатоступінчастих сигналів, розроблений в розділі 2.

На *етапі 2* для побудови простору діагностичних ознак ОД використовуються спектральні перетворення у вигляді перетворень Карунена-Лоєва, вейвлет-перетворень та моментів перетинів БВФ або БПФ, запропоновані в розділі 3.

На *етапі 3* для побудови діагностичної моделі ОД використовуються відомі статистичні методи або нейронні мережі.

Отримані на етапах 1–3 інформаційні моделі, простори діагностичних ознак, діагностичні моделі зберігаються в базі даних БД для подальшого використання.

На *етапі 4* якість діагностичної моделі оцінюється за виразом (25).

На *етапі 5* якість простору діагностичних ознак обчислюється за відомими оцінками кількості інформації, які використовуються в інформаційному та компонентному аналізі або за непрямыми оцінками, отриманим за результатами навчання збудованої в обраному діагностичному просторі моделі, наприклад, за виразом (25).

На *етапі 6* точність інформаційної моделі оцінюється відомими методами, наприклад, за допомогою критерію мінімуму середньоквадратичної помилки (18).

**П'ятий розділ** присвячено розробці програмної архітектури високопродуктивних обчислень у вигляді веб-сервісу з використанням хмарних технологій машинного навчання.

На основі запропонованих у дисертації моделей, розроблених методів та базової ІТ вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів реалізовано АСТД «ІСІДА-WEB» у вигляді програмних засобів web-сервісу. Структурна схема програмних засобів АСТД «ІСІДА-WEB» зображена на рис. 7.



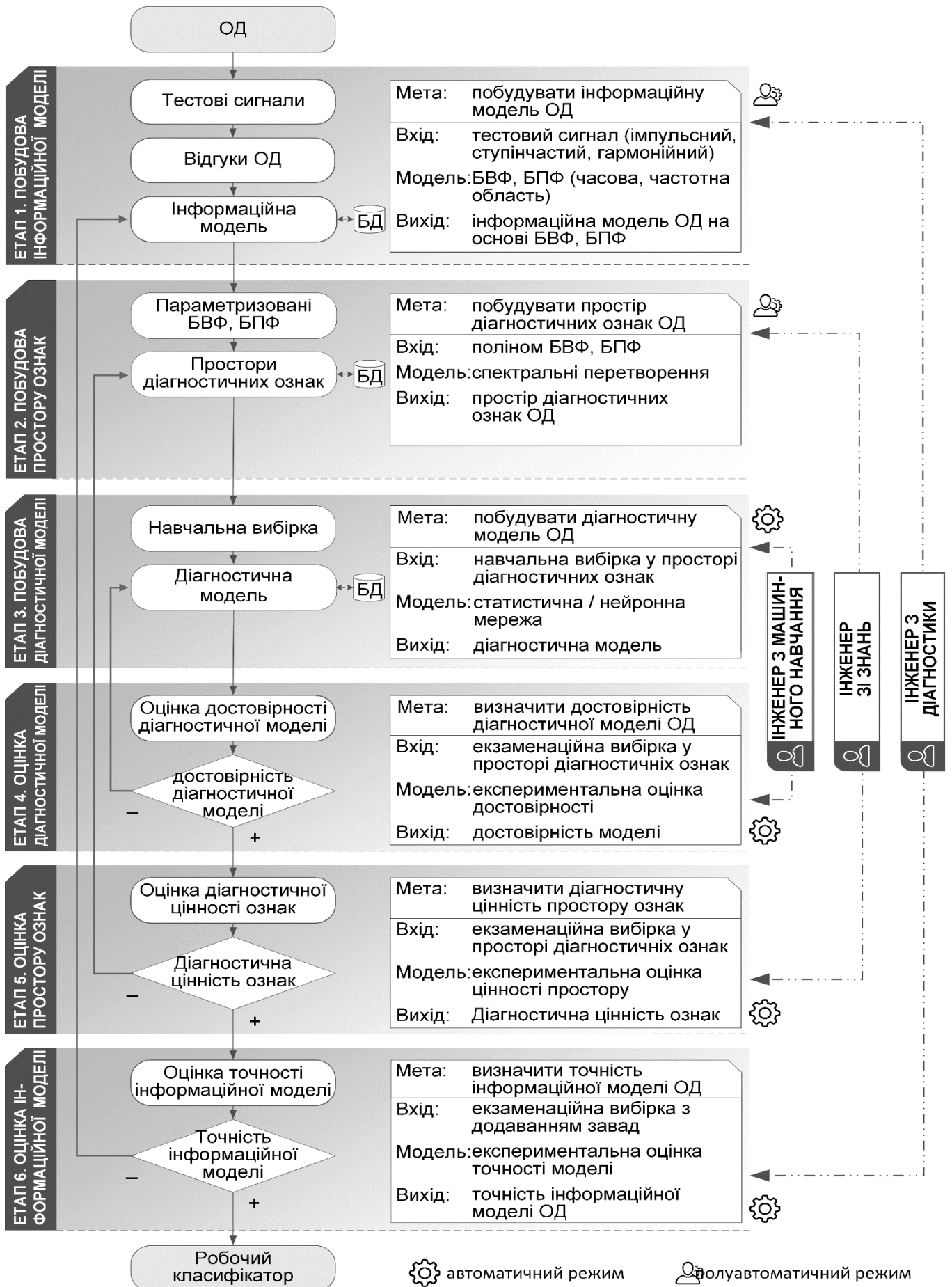


Рисунок 6. Базова ІТ вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД в системах АСТД



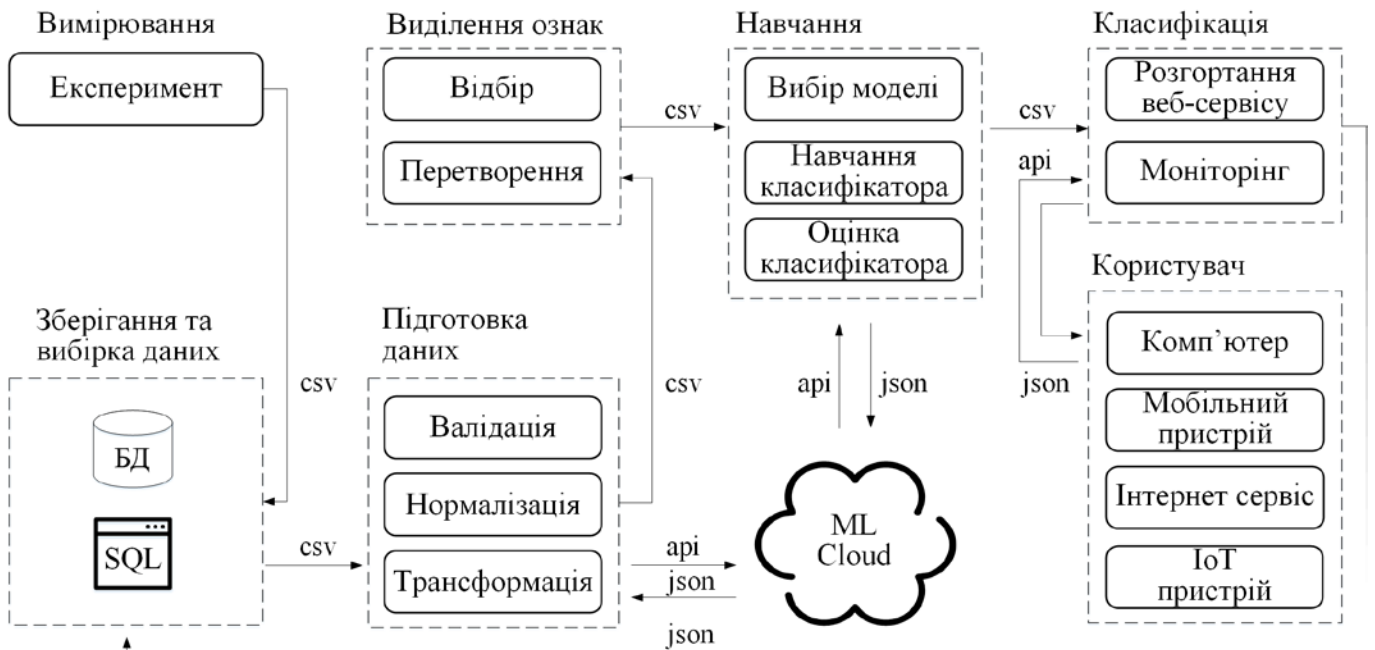


Рисунок 7. Структурна схема програмних засобів АСТД «ІСІДА-WEB»

За допомогою технології взаємодії застосувань на основі RESTful стандарту побудовано API інтерфейс для взаємодії web-сервісу з зовнішніми застосуваннями: базами даних, настільними, мобільними, IoT пристроями, web-сервісами та хмарними IDE.

Функціональні частини АСТД виконано у вигляді незалежних модулів. Це рішення дозволяє клонувати функціональні частини АСТД для побудови інтернет/інтранет систем. Так, на основі клонування функціональних частин АСТД «ІСІДА-WEB» побудовані локальні проблемно-орієнтовані системи:

- АСТД стану електродвигунів і прогнозування їх залишкового ресурсу,
- АСТД станів ріжучих інструментів,
- ІС ідентифікації окорухового апарату за допомогою відеореєстрації,
- ІС ідентифікації економічних процесів.

Використання АСТД «ІСІДА-WEB» дозволяє у комплексі вирішувати задачі побудови ІС, скоротити непродуктивні витрати часу на підготовку даних та забезпечує ефективну взаємодію реалізованих алгоритмів обробки даних.

У **шостому розділі** розглядаються застосування базової ІТ вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в АСТД та засоби її адаптації до вирішення практичних задач видобування діагностичної інформації.

*Побудова діагностичної моделі вентильно-реактивного двигуна (ВРД).*

ВРД, в яких комутація фаз обмотки здійснюється за допомогою напівпровідникової схеми за сигналами від датчика положення ротора, визначають собою науково-технічний напрям, який швидко розвивається. Електропривод на основі таких двигунів все більш широко використовується в таких областях техніки і промисловості, як приладова автоматика, насосне та компресорне обладнання,

верстатобудування і робототехніка, автоматизовані технологічні лінії, транспорт, аерокосмічна техніка і ін.

У процесі тривалої роботи ротор ВРД відчуває тертя об повітря і з плином часу повітряний проміжок  $\delta$  між ротором і статором в двигуні збільшується, а отже, знижуються його енергетичні показники. Тому, в процесі експлуатації ВРД необхідно періодично контролювати величину  $\delta$ . Прямі вимірювання  $\delta$  неприйнятні, оскільки вони трудомісткі і вимагають виведення ВРД з експлуатації на час контролю.

Для оцінки величини повітряного проміжку  $\delta$  між ротором і статором ВРД пропонується використовувати дані побічних вимірювань «вхід-вихід», на основі яких будується інформаційна модель у вигляді БВФ  $w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$ . Структурна схема організації експерименту «вхід-вихід» в задачі діагностування ВРД наведена на рис. 8. Вхідний сигнал  $x(t)$  задається генератором діагностичних сигналів ГДС, вихідний сигнал  $y(t)$  вимірюється реєструючим пристроєм РП.

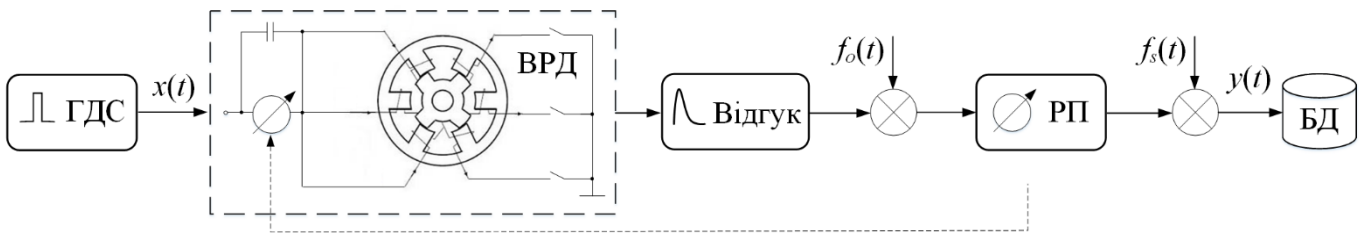


Рисунок 8. Структурна схема організації експерименту «вхід-вихід» в задачі діагностування ВРД

Ідентифікація ВРД у вигляді БВФ здійснюється за допомогою імітаційної моделі двигуна ВРЕП–57–005 (номінальний момент – 0.05 Н/м, номінальна напруга – 24 В, максимальна частота обертання – 4500 об/хв), яка задає неявний опис «вхід-вихід» при фіксованому положенні ротора у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} U_\phi = I_\phi R_\phi + \frac{d\Psi_\phi}{dt}, \\ \Psi_\phi = f_1(I_\phi, \Theta) \end{cases} \quad (27)$$

де  $U_\phi(t)$  – напруга (вхідна змінна);  $I_\phi(t)$  – струм (вимірюваний відгук ВРД, вихідна змінна);  $R_\phi$  – опір,  $\Psi_\phi$  – потокозчеплення фази;  $\Theta$  – кут положення ротора щодо статора.

На основі імітаційної моделі отримані нелінійні залежності  $\psi_\phi(I_\phi)$  для кута положення ротора щодо статора  $\Theta = 30^\circ$  і трьох повітряних зазорів між ротором і статором: номінального  $\delta_n = 0.15$  мм та  $\delta = 1.3\delta_n$  і  $\delta = 1.6\delta_n$ , відповідних збільшенню на 30% та 60% відносно номінального. Чисельний розрахунок залежностей (27) виконується на основі польової математичної моделі ВРД методом кінцевих елементів (рис. 9).

Аналітичні вирази для БВФ першого  $t$  порядку і діагональних перетинів БВФ другого порядку:

$$w_1(t) = e^{-\alpha t}, \quad w_2(t, t) = \frac{\beta}{\alpha} (e^{-2\alpha t} - e^{-\alpha t}). \quad (28)$$

Навчальна вибірка у вигляді БВФ першого порядку  $w_1(t)$  (рис. 10, а) і діагональних перетинів БВФ другого порядку  $w_2(t,t)$  (рис. 10, б) при різних значеннях повітряного зазору  $\delta$  отримана для різноманітних станів ВРД і поділена на 3 класи по 100 елементів у кожному класі: для  $\delta \in [\delta_n, 1.3\delta_n]$  (нормальний режим – клас А),  $\delta \in (1.3\delta_n, 1.6\delta_n]$  (режим несправності – клас В),  $\delta > \delta_n$  (аварійний режим – клас С).

Аналогічно отримані 4 навчальні вибірки з рівнем завад  $\epsilon$  при оцінці БВФ, відповідно, 1%, 3%, 5%, 10% від максимуму БВФ першого порядку  $w_1(t)$  (рис. 11, а) та другого порядку  $w_2(t,t)$  (рис. 11, б) для класів А, В та С. Завади в оцінках БВФ – це адитивний шум з нульовим математичним очікуванням і дисперсією, що залежить від максимуму функції.

Класифікація станів ВРД проводиться за допомогою їхнього опису у діагностичних просторах, отриманих на основі БВФ:  $\{w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)\}_{k=1, \dots, N} \Rightarrow \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)'$  ( $N$  – порядок моделі;  $n$  – розмірність простору ознак).

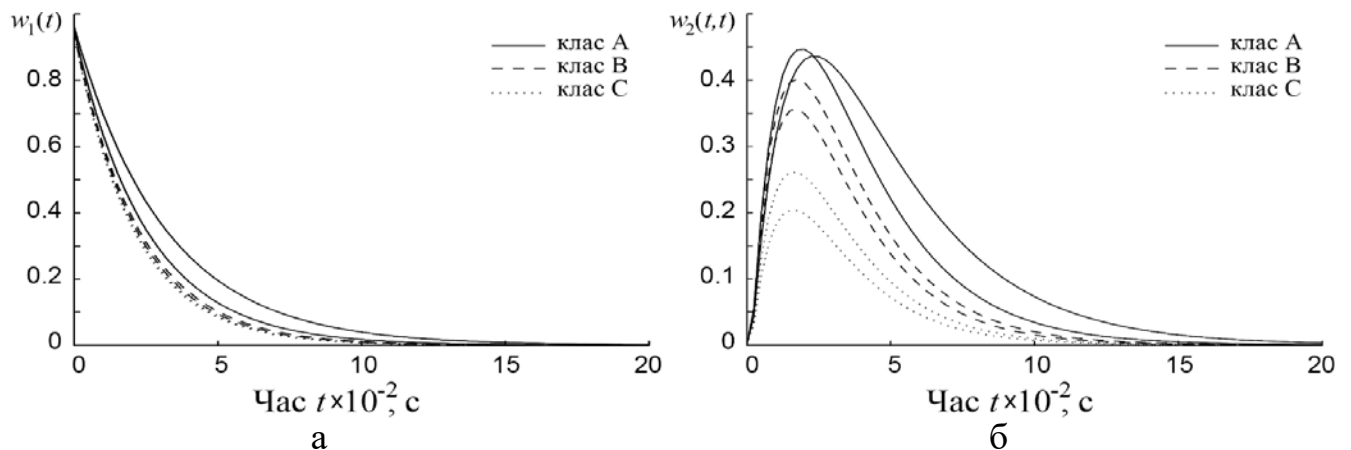


Рисунок 9. Залежності  $\Psi_\phi \times 10^{-3}(I_\phi(t), A)$  при  $\Theta = 30^\circ$  для величин повітряних зазорів  $\delta_n, 1.3\delta_n$  та  $1.6\delta_n$

Рисунок 10: а – БВФ першого порядку  $w_1(t)$ ; б – діагональний перетин БВФ другого порядку  $w_2(t,t)$  для класів А, В та С

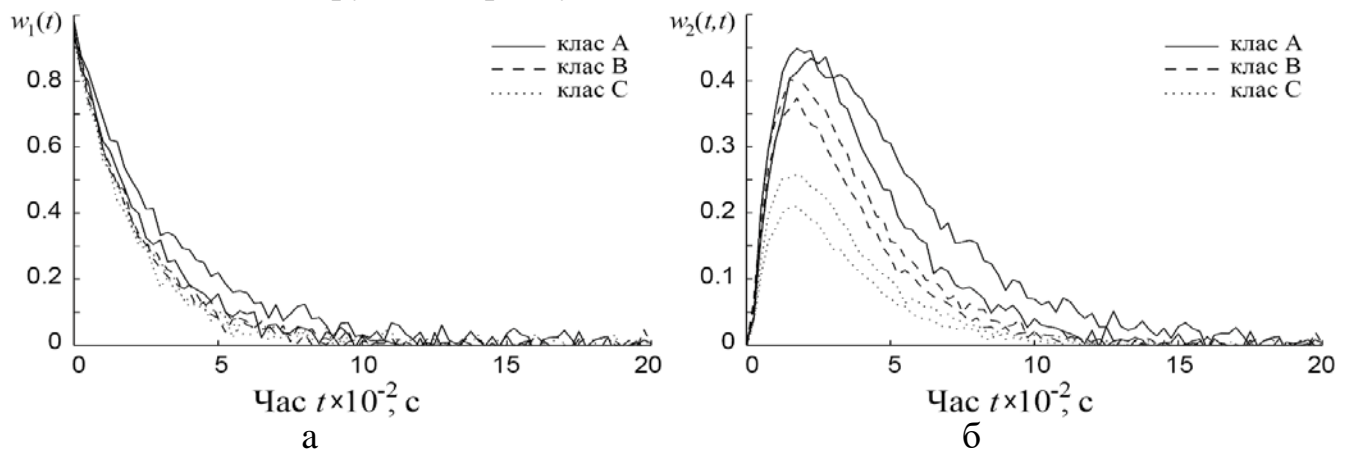


Рисунок 11: а – БВФ першого порядку  $w_1(t)$ ; б – діагональний перетин БВФ другого порядку  $w_2(t,t)$  для класів А, В та С

Розглядаються діагностичні моделі на основі лінійної інформаційної моделі ВРД у вигляді БВФ першого порядку:  $x_k=w_1(t_k)$ ,  $t_k=k\Delta t$ ,  $k=1,10$  (діагностичний простір  $V_1$ ). Достовірність діагностичних моделей наведена в табл. 1 та на рис. 12, а. Діагностичний простір  $V_1$  має достатню достовірність, яка при дії завад істотно зменшується.

Таблиця 1 – Достовірність діагностичних моделей.

Діагностичний простір	Діагностичні ознаки	Рівень завади $\varepsilon$ , %				
		0	1	3	5	10
$V_1$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0,993	0,981	0,936	0,885	0,825
$M_1$	$x_1, x_2, x_3$	0,994	0,988	0,980	0,954	0,927
$W_1$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	1	0,995	0,990	0,973	0,946
$V_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	1	0,998	0,995	0,987	0,979
$M_2$	$x_1, x_2, x_3$	1	0,999	0,997	0,994	0,993
$W_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	1	1	0,999	0,996	0,995
$V_{1,2}$	$x_1, x_4, x_6, x_{14}$	1	1	0,999	0,997	0,995
$M_{1,2}$	$x_1, x_3, x_5, x_6$	1	1	1	0,999	0,997
$W_{1,2}$	$x_1, x_3, x_{11}, x_{12}$	1	1	1	1	0,999

Для підвищення достовірності діагностування розглядаються моделі на основі моментів БВФ першого порядку: моменти  $x_r=\mu_r^{(1)}$ ,  $r=0,1,2,3$  (діагностичний простір  $M_1$ ) та вейвлет-перетворення БВФ  $x_i=c_{1i}$ ,  $i=1,\dots,5$  (діагностичний простір  $W_1$ ). Діагностичні простори  $M_1$  та  $W_1$  дозволяють підвищити достовірність діагностування, яка при збільшенні рівня завад істотно зменшується.

Для покращення результатів діагностування будуються діагностичні моделі на основі нелінійної інформаційної моделі ВРД у вигляді БВФ другого порядку:  $x_k=w_2(t_k)$  (діагностичний простір  $V_2$ ), а також моменти  $x_r=\mu_r^{(2)}$  (діагностичний простір  $M_2$ ) та вейвлет-перетворення БВФ  $x_i=c_{2i}$  (діагностичний простір  $W_2$ ). Достовірність діагностичних моделей в залежності від рівня завад наведена в табл. 1 та на рис. 12, б.

Для отримання найкращих результатів діагностування запропоновано сімейство діагностичних моделей на основі інформаційних моделей ВРД у вигляді БВФ першого та другого порядку, які виносяться на захист як п.2.5 наукової новизни:  $x_i=w_1(t_i)$ ,  $x_{i+10}=w_2(t_i, t_i)$ ,  $i = \overline{1,10}$  (діагностичний простір  $V_{1,2}$ ), а також моменти  $x_r=\mu_r^{(1)}$ ,  $x_{r+4}=\mu_r^{(2)}$  (діагностичний простір  $M_{1,2}$ ) та вейвлет-перетворення БВФ  $x_i=c_{1i}$ ,  $x_{i+5}=c_{2i}$  (діагностичний простір  $W_{1,2}$ ). Достовірність діагностичних моделей в залежності від рівня завад наведена в табл. 1 та на рис. 12, в.

Простори ознак  $M_{1,2}$ ,  $W_{1,2}$  демонструють більшу завадостійкість, ніж інші розглянуті простори.

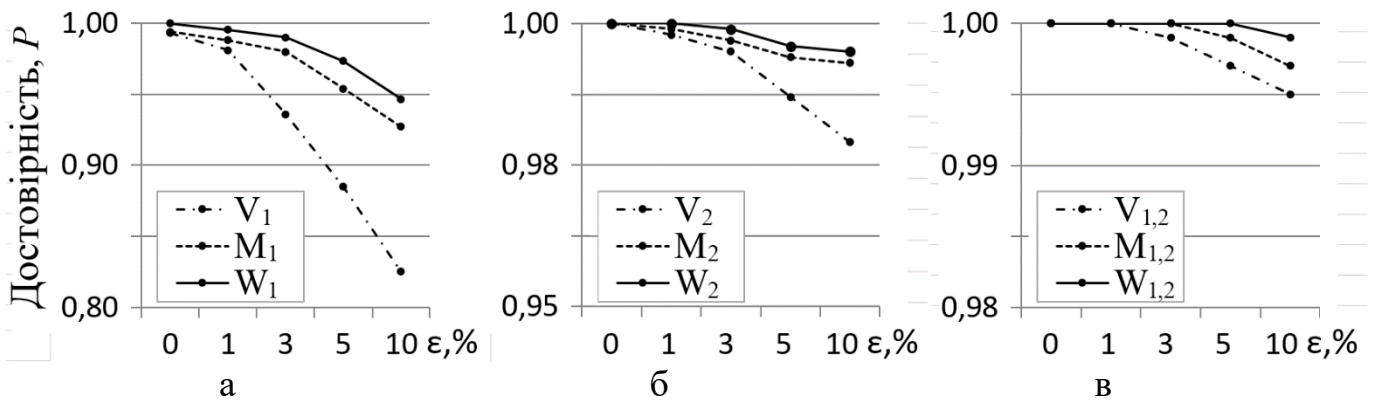


Рисунок 12. Достовірність діагностичних моделей: а – на основі БВФ першого порядку; б – на основі БВФ другого порядку; в – на основі БВФ першого та другого порядку

*Побудова діагностичних моделей різального інструменту (PI) металообробних верстатів.*

Для забезпечення високої якості виробничих процесів в сучасних металорізальних верстатах використовується метод прямого контролю стану PI шляхом обробки послідовності зображень його зон зношування, що вимагає досить значних витрат часу на попередню обробку зображень для підвищення їх якості, виділення контурів та текстур зон зношування. На базі оброблених зображень формуються діагностичні моделі та будуються класифікатори. Фактор часу побудови діагностичних моделей є суттєво вагомим, бо швидкість обробки на модульних металорізальних верстатах гнучких виробничих модулів постійно підвищується.

Разом з цим підвищується інтенсивність процесів зношування PI. Тому значні витрати часу на отримання параметрів та постановку діагнозу можуть привести до його запізнення.

Для підвищення оперативності діагностування вдосконалено програмний комплекс, що забезпечує обробку даних – результатів непрямого контролю станів різальних інструментів (різців, кінцевих та торцевих фрез) з використанням технологій генетичних алгоритмів, що дозволяє суттєво скоротити час побудови діагностичних моделей у порівнянні з методом повного перебору.

При цьому операції обробки візуальних даних залишаються найбільш повільною ланкою в АСТД з прямим контролем послідовності зображень PI. Тому стає більш перспективним запропонований у роботі метод непрямого контролю та діагностування стану інструментів, що спирається на побудові діагностичних моделей з використанням сигналів динамічних відгуків.

У сучасних технологічних процесах мають місце операції обробки деталей, специфіка яких наводить до виникнення періодичних ударних навантажень на ріжучу частину PI. Прикладом є операція торцевого фрезерування, коли ширина заготовки менше діаметру фрези. Тут кожен зуб фрези періодично виходить з контакту із заготовкою, процес різання припиняється і потім знову відбувається врізання в заготовку. Іншим прикладом є так зване ударне точіння, в процесі якого передня поверхня ріжучої частини різця періодично сприймає ударне навантаження.

Специфічні умови вантаження РІ, періодичні динамічні навантаження обумовлюють ряд особливостей зношування таких інструментів. Має місце поява дефектів типу мікротріщин та мікросколів ріжучих кромки. Тому виникає необхідність адаптації методу діагностування станів РІ на основі непрямих вимірювань шляхом використання тестових імпульсних впливів на систему різання (СР), що винесено на захист, як п.3 наукової новизни.

*Метод побудови діагностичних моделей станів РІ на основі непрямих вимірювань шляхом використання тестових імпульсних впливів на СР* реалізується в наведеній нижче послідовності:

*Крок 1.* Формування тестових ступінчастих впливів на СР  $x_k = k\alpha\theta(t)$ , де  $k=1, 2, \dots, n$  – кількість сходинок з амплітудою, кратною  $\alpha$ .

Необхідність багатократного ступінчастого вантаження СР обумовлена її нелінійністю. Формування ступінчастих впливів  $x_k$  реалізується у вигляді серії врізань РІ в заготовку (в межах припуску, що підлягає видаленню на даному технологічному переході).

*Крок 2.* Реєстрація відгуків СР  $y_k(t)$  на ступінчасті впливи  $x_k$ .

*Крок 3.* Побудова інформаційної моделі  $h(t)$  у вигляді БПФ за виразом (8) на основі отриманих відгуків  $y_k(t)$ .

*Крок 4.* Побудова діагностичної моделі з використанням вторинної спектрально-статистичної ідентифікації перетинів БПФ  $h_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n)$ .

*Крок 5.* Інформаційна оптимізація діагностичної моделі.

Для отримання первинної діагностичної інформації (кроки 1 та 2) використовується стенд, структурна схема якого представлена на рис. 13.

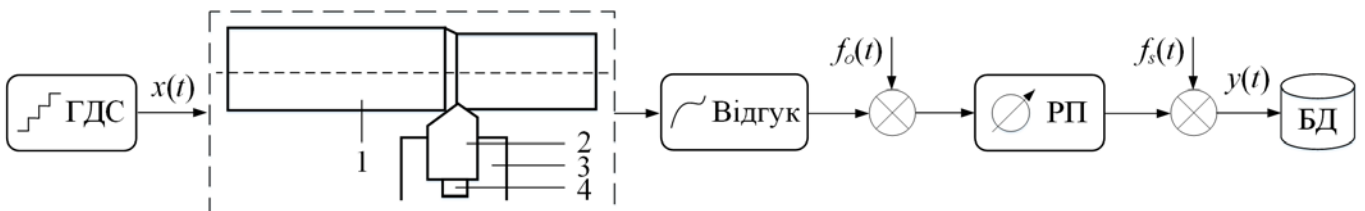


Рисунок 13. Структурна схема організації експерименту «вхід-вихід» в рамках задачі діагностування процесу точіння з періодичним ударним навантаженням: 1 – заготовка; 2 – РІ (різець); 3 – різцетримач; 4 – пристрій вимірювання відгуків

При обробці заготовки 1 різцем 2 датчик непрямого контролю 4 генерує сигнали. На рис. 14 наведено осцилограму відгуків СР: зміну активної потужності  $P_a$  асинхронного електродвигуна головного руху в часі, яка відображає два скачки, що відповідають двом впливам на фрезу.

Результати ідентифікації тестових РІ з використанням ступінчастих сигналів – оцінки перехідної функції першого порядку  $\hat{h}_1(t)$ , і діагонального перетину перехідної функції другого порядку  $\hat{h}_2(t,t)$  представлені у вигляді графіків на рис. 15, а.

З використанням розглянутого методу побудовані моделі РІ, які відносяться до різних класів станів  $\Omega_1$  та  $\Omega_2$ .

На рис. 15, б представлені оцінки перехідної функції першого порядку  $\hat{h}_1(t)$  для РІ, що відносяться до різних класів станів. На рис. 15, в представлені оцінки перехідної функції другого порядку  $\hat{h}_2(t,t)$  для РІ, що відносяться до різних класів станів.



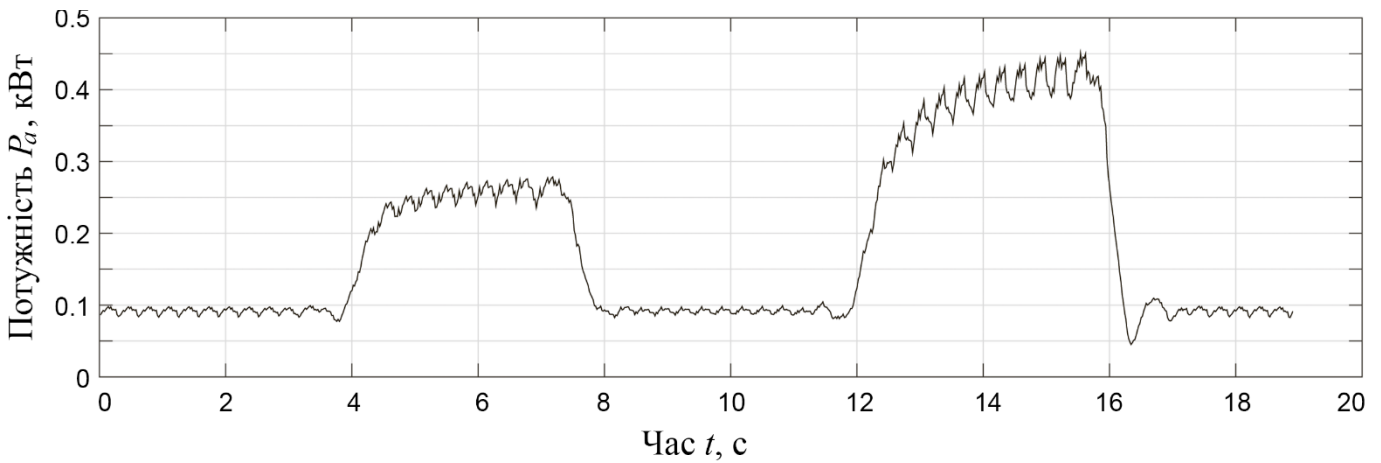


Рисунок 14. Залежність активної потужності процесу різання від часу

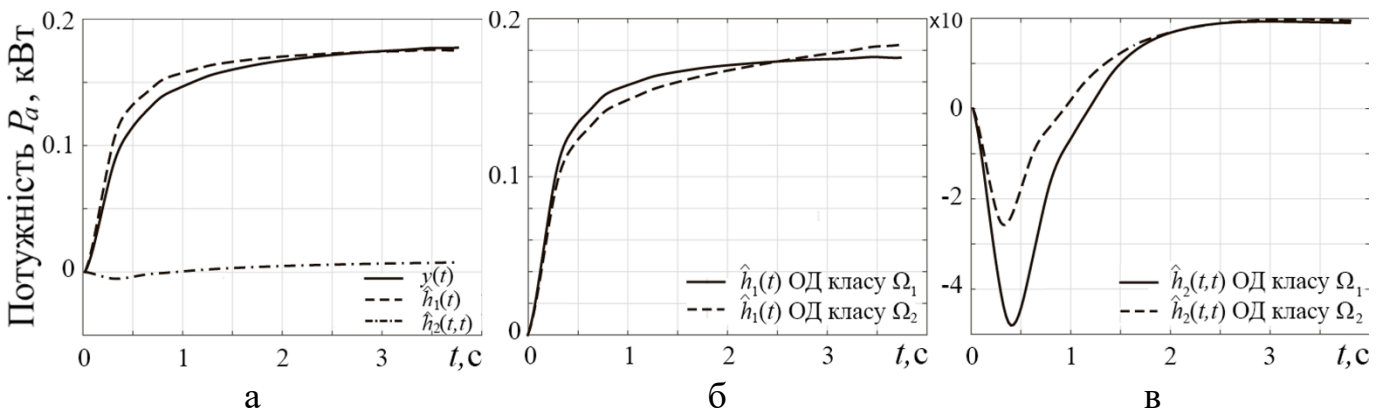


Рисунок 15. Результати ідентифікації РІ з використанням ступінчастих сигналів: а – вихідний сигнал  $y(t)$  і оцінки перехідної функції першого порядку  $\hat{h}_1(t)$ , і діагонального перетину перехідної функції другого порядку  $\hat{h}_2(t,t)$ ; б – оцінки перехідної функції першого порядку  $\hat{h}_1(t)$  для РІ, що відносяться до різних класів станів  $\Omega_1$  та  $\Omega_2$ ; в – оцінки перехідної функції другого порядку  $\hat{h}_2(t,t)$  для РІ, що відносяться до різних класів станів  $\Omega_1$  та  $\Omega_2$

Детермінований підхід до класифікації станів РІ за лінійною моделлю, яка представлена оцінкою перехідної функції першого порядку  $\hat{h}_1(t)$ , має певні труднощі, оскільки функції  $\hat{h}_1(t)$  для класів станів  $\Omega_1$  та  $\Omega_2$  утворюють області, що накладаються.

При цьому, оцінки перехідних функцій другого порядку  $\hat{h}_2(t,t)$  несуть більшу діагностичну цінність (інформація про належність об'єкта до класу станів  $\Omega_1$  або  $\Omega_2$ ).

Метод дозволяє підвищити достовірність діагностування станів РІ на 4–6% та оперативність діагностування в 1,5–3 рази у порівнянні з системою технічного зору, заснованою на прямих вимірюваннях геометричних параметрів зони зносу.

*Побудова інформаційної моделі око-рухового апарату (ОРА) людини.*

Технології на основі відстеження поведінки зорового аналізатора вже отримують поширення в багатьох сферах: медична (офтальмологічна, неврологічна) діагностика, побудова інтерфейсів ІС, управління технічними об'єктами, автентифікація, тренування в спорті та інше.

Більшість застосувань eye-tracking використовує тільки прямі виміри положення об'єкта в просторі в реальному часі, не враховуючи нелінійні і динамічні властивості ОРА. Тому діагностування ОРА шляхом побудови непараметричної інтегральної моделі, що містить раніше невикористовувану інформацію про нелінійні

і динамічні властивості об'єкту, отриманої на основі експериментальних досліджень «вхід-вихід» є перспективним напрямком розвитку технології eye-tracking.

Розроблено метод побудови інтегральної багатовимірної непараметричної динамічної моделі окорухового апарату людини у вигляді перехідної та двовимірної перехідної функцій на основі даних експериментів «вхід-вихід» з використанням тестових багатоступінчастих сигналів, що винесено на захист, як п.2.6 наукової новизни. Метод реалізується в наведеній нижче послідовності:

*Крок 1.* Формування тестових ступінчастих впливів на ОРА  $\{x_1(t)=ka\theta(t), x_2(t)=kb\theta(t)\}$ , де  $k=1, 2, \dots, n$  – кількість сходинок з амплітудою, кратною  $a$  та  $b$  відповідно.

Необхідність багатократного ступінчастого тестування ОРА обумовлена її нелінійністю. Формування ступінчастих впливів  $x_k(t)$  реалізується у вигляді серії світлових подразнень ОРА на різних відстанях по горизонталі та вертикалі.

*Крок 2.* Реєстрація реакції ОРА на ступінчасті впливи  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$  відповідно у вигляді відеозапису та побудова на його основі відгуків  $y_1(t)$  та  $y_2(t)$  по горизонталі та вертикалі відповідно.

*Крок 3.* Побудова інформаційної моделі  $\{\hat{y}_1(t), \hat{y}_2(t)\}$  у вигляді БПФ за виразом (12) на основі отриманих відгуків  $y_1(t)$  та  $y_2(t)$ .

Для ідентифікації ОРА використовується багатовимірна модель з двома входами: дві пари прямих м'язів (входи об'єкту) забезпечують рух ока вгору-вниз, вправо-вліво, а також різні їх комбінації. Вимірюються відгуки: координати  $u(t)$  – по горизонталі та  $v(t)$  – по вертикалі поточного становища зіниці ока відносно початкового положення  $u_0$  і  $v_0$  (виходи об'єкту). При цьому в моделі (2) приймається  $\nu=2$  і  $\mu=2$ .

Побудова моделі здійснюється за обчислювальним методом непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД з двома входами та двома виходами, розробленим у розділі 2.

Для отримання експериментальних даних «вхід-вихід» створено апаратно-програмну мікропроцесорну систему на основі відстеження положення зіниці за допомогою відеореєстрації руху (реакції) зіниці на збурення у вигляді світлової крапки, яка переміщується по екрану стенду за спеціально розробленим алгоритмом. Структурна схема організації експерименту «вхід-вихід» з використанням апаратно-програмної мікропроцесорної системи ідентифікації ОРА наведена на рис. 16.

Вимірювання проводяться з точністю до 0,02 мм. Якщо прийняти в якості величини похибки вимірювань розмір точки зображення з відеоряду, то задана точність забезпечується вибором відеокамери стандарту Full HD з роздільною здатністю 1920x1080 точок (2.0MP).

Виміряні відгуки ОРА  $y_1(t)$  та  $y_2(t)$  (по горизонталі) на вхідні тестові сигнали  $\{x_1=\alpha\theta(t), x_2=0\}$  і  $\{x_1=2\alpha\theta(t), x_2=0\}$  відповідно, представлені на рис. 17, а. Аналогічно вимірюються відгуки  $y_1(t)$  та  $y_2(t)$  (по вертикалі) на вхідні тестові сигнали  $\{x_1=0, x_2=\beta\theta(t)\}$  і  $\{x_1=0, x_2=2\beta\theta(t)\}$  (рис. 17, б).

Перехідні функції ОРА першого порядку по першому входу (по горизонталі)  $\hat{h}_1^{(1)}(t)$  і другому входу (по вертикалі)  $\hat{h}_2^{(2)}(t)$  визначаються формулою (12).



Перехідні функції ОРА другого порядку по першому входу (по горизонталі)  $\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t)$  та по другому входу (по вертикалі)  $\hat{h}_{22}^{(2)}(t,t)$  визначаються за формулою (13).

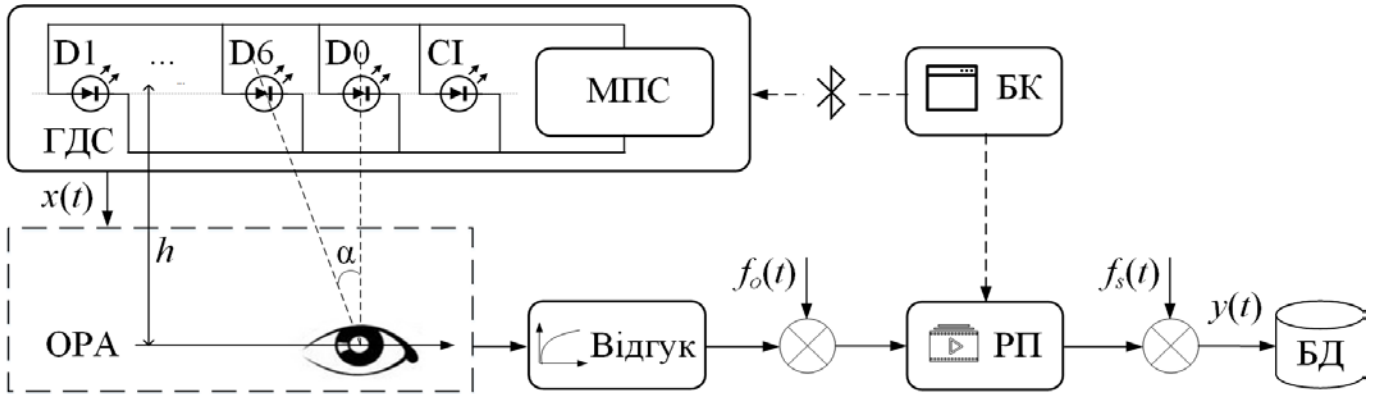


Рисунок 16. Структурна схема організації експерименту «вхід-вихід» в задачі ідентифікації ОРА

Перехідна функція ОРА другого порядку по першому і другому входам  $\hat{h}_{12}^{(j)}(t,t)$  характеризує взаємний вплив прямих м'язів ока, під дією входних впливів  $\{x_1=\alpha\theta(t), x_2=\beta\theta(t)\}$ ,  $\{x_1=\alpha\theta(t), x_2=0\}$  і  $\{x_1=0, x_2=\beta\theta(t)\}$  і визначається за формулою (14).

Графіки перехідних характеристик ОРА першого  $\hat{h}_1^{(1)}(t)$ ,  $\hat{h}_2^{(2)}(t)$  і другого  $\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t)$ ,  $\hat{h}_{22}^{(2)}(t,t)$  порядків (по горизонталі і вертикалі) представлені на рис. 18, а та 18, б відповідно.

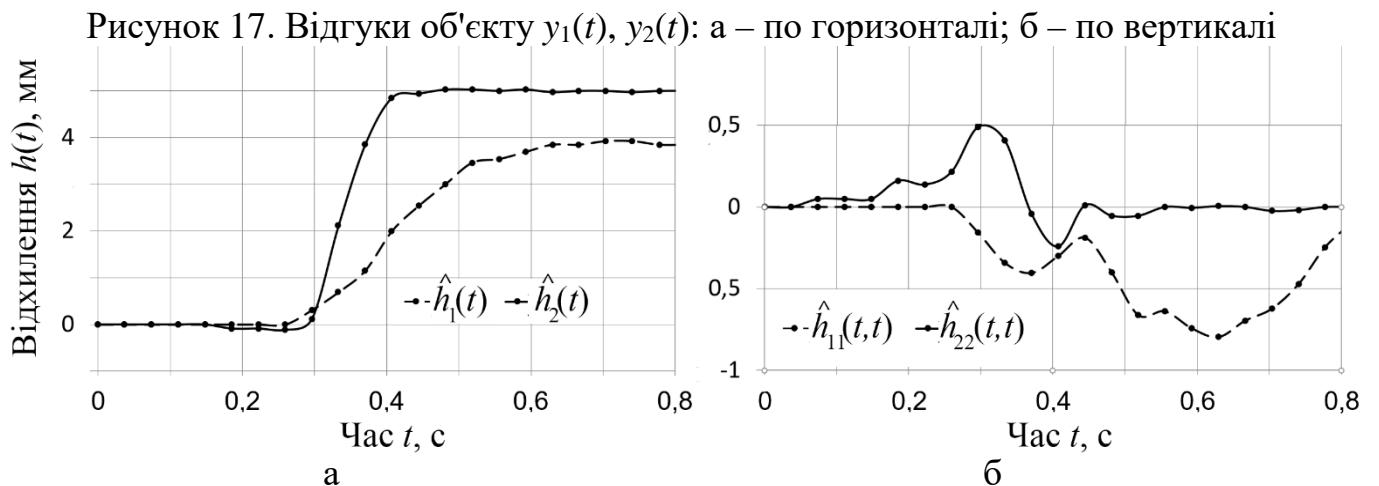
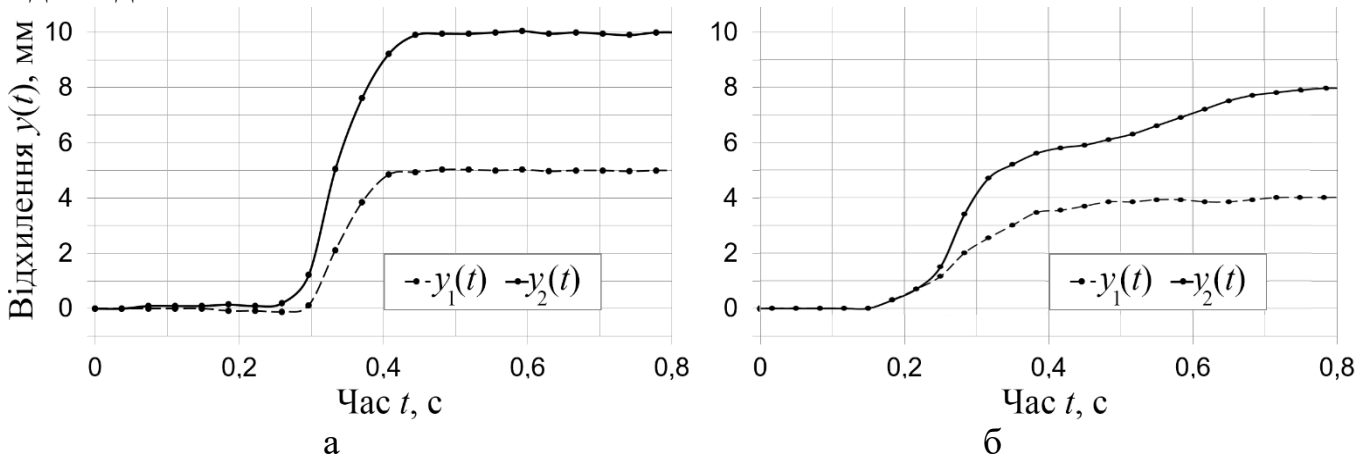


Рисунок 18. Перехідні характеристики ОРА: а – першого порядку  $\hat{h}_1^{(1)}(t)$ ,  $\hat{h}_2^{(2)}(t)$ ; б – другого порядку  $\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t)$ ,  $\hat{h}_{22}^{(2)}(t,t)$

Відгуки моделі ОРА на основі перехідних характеристик першого і другого порядку за двома входами і двома виходами наближено описується виразом (15).

Оскільки експериментально встановлено, що

$$\begin{aligned} \hat{h}_2^{(1)}(t) \equiv 0, \hat{h}_1^{(2)}(t) \equiv 0, \hat{h}_{12}^{(1)}(t,t) \equiv 0, \hat{h}_{21}^{(1)}(t,t) \equiv 0, \\ \hat{h}_{22}^{(1)}(t,t) \equiv 0, \hat{h}_{11}^{(2)}(t,t) \equiv 0, \hat{h}_{12}^{(2)}(t,t) \equiv 0, \hat{h}_{21}^{(2)}(t,t) \equiv 0, \end{aligned} \quad j=1,2, \quad (29)$$

відгуки моделі ОРА наближено описується виразом.

$$\begin{aligned} \hat{y}_1(t) &= a\hat{h}_1^{(1)}(t) + a^2\hat{h}_{11}^{(1)}(t,t), \\ \hat{y}_2(t) &= b\hat{h}_2^{(2)}(t) + 2b^2\hat{h}_{22}^{(2)}(t,t). \end{aligned} \quad (30)$$

Траєкторія руху зіниці ока  $\hat{y}(t)$  при одночасному збудженні за двома входами (горизонтальному і вертикальному) на основі відгуків моделі ОРА  $\hat{y}_1(t)$  і  $\hat{y}_2(t)$  визначається виразом:

$$\hat{y}(t) = \sqrt{\hat{y}_1^2(t) + \hat{y}_2^2(t)}, \quad j=1,2. \quad (31)$$

Порівняння відгуку побудованої моделі ОРА одночасно за двома входами з експериментальними даними – відгуком об'єкта ідентифікації  $y(t)$  (рух по діагоналі) – представлено на рис. 19.

Верифікація побудованої моделі ОРА показала адекватність її досліджуваному об'єкту: процентна нормована середньоквадратична помилка (19)  $\varepsilon_n = 5.8\%$ , що підтверджує точність методу непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД на основі БПФ з використанням тестових ступінчастих сигналів.

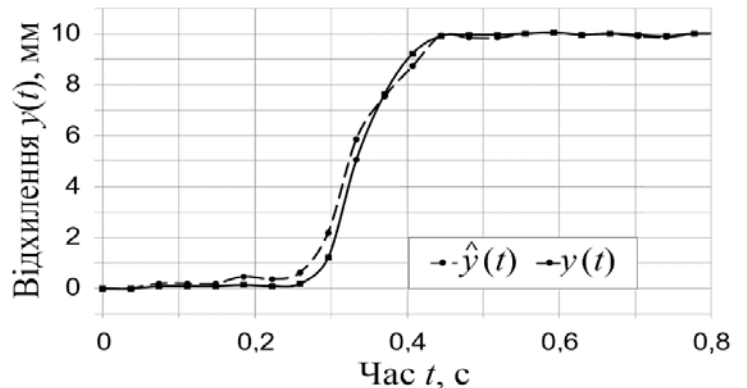


Рисунок 19. Відгуки ОРА  $y(t)$  і моделі  $\hat{y}(t)$

*Побудова інформаційних моделей в застосуваннях цифрового маркетингу.*

В умовах розвитку цифрової економіки виникає багато задач, пов'язаних з моделюванням економічних процесів, в тому числі прогнозування ефективності маркетингових заходів в мережі інтернет в процесі планування виробництва та збуту та фінансування рекламних кампаній.

Поширеним в цій галузі є використання статистичних моделей. Але при відсутності достатньої кількості даних про ОД ефективним напрямом є використання інтегральних непараметричних динамічних моделей, отриманих на основі експериментальних досліджень «вхід-вихід».

Для ідентифікації маркетингових заходів використовується модель з одним входом (збурюючий вплив на цільову аудиторію задається у вигляді рекламних оголошень) і одним виходом (відгуки у вигляді статистики відвідувань інтернет-ресурсу, який рекламується, отримані з системи інтернет-статистики).

Побудова моделі здійснюється за обчислювальним методом непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД з одним входом та одним виходом, розробленим у розділі 2.

Структурна схема організації експерименту «вхід-вихід» для побудови інформаційних моделей застосувань цифрового маркетингу наведена на рис. 20.

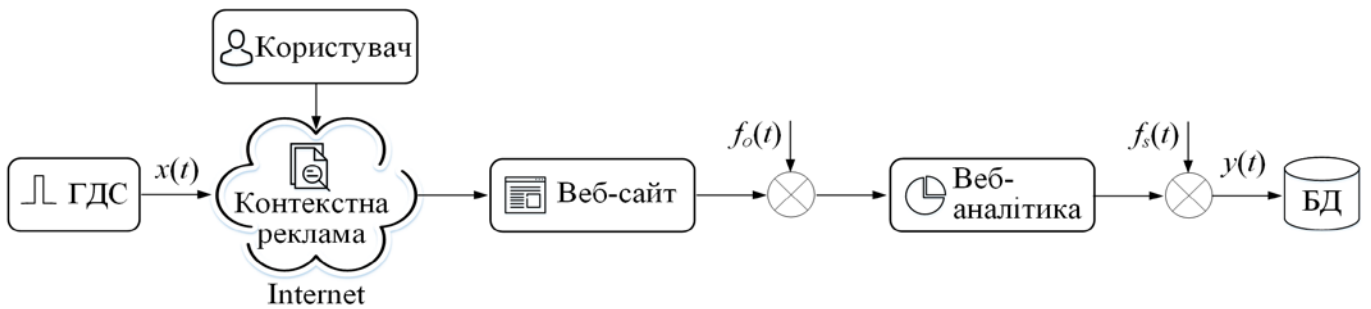


Рисунок 20. Структурна схема експерименту «вхід-вихід» для побудови інформаційних моделей застосувань цифрового маркетингу

В якості ОД розглядаються рекламні заходи вищого навчального закладу в мережі інтернет під час вступної кампанії 2017 року. В якості ГДС використовується сервіс контекстної реклами Google Ads (вхідний вплив – рекламний бюджет). Вихідні дані (візити на сайт  $K$ ) отримані з системи інтернет-статистики Google Analytics.

Виміряні відгуки  $y_1(t)$  та  $y_2(t)$  на вхідні тестові сигнали  $2\alpha\theta(t)$  та  $\alpha\theta(t)$ , які діють з моментів  $t_1$  та  $t_2$  відповідно, представлені на рис. 21.

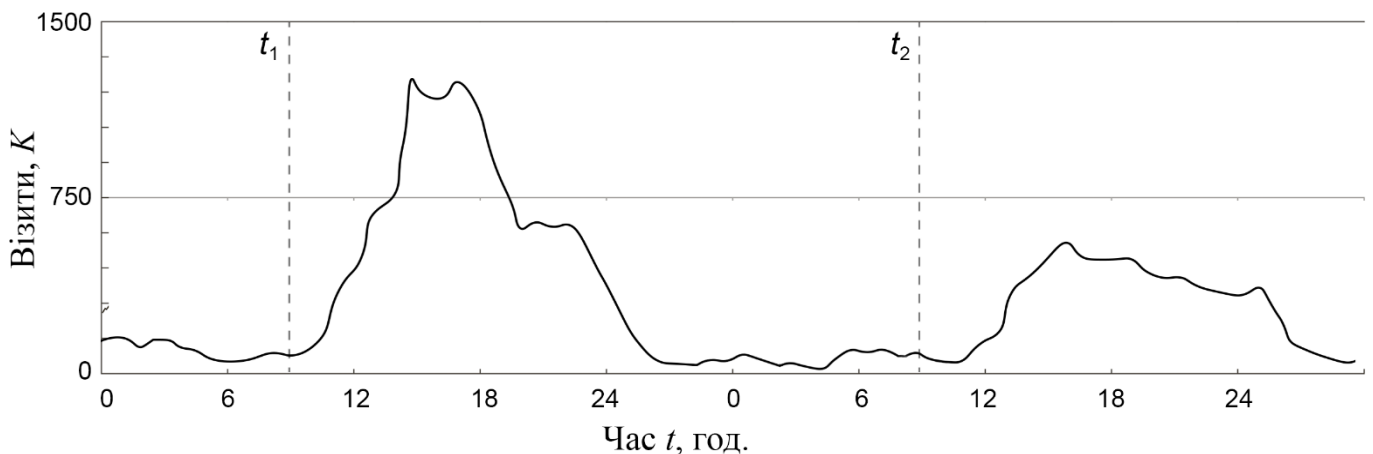


Рисунок 21. Статистика Google Analytics погодинних відвідувань сайту закладу

Після нормування отриманої різниці, отримуємо перехідні функції першого  $\hat{h}_1(t)$  та другого  $\hat{h}_2(t,t)$  порядку за формулами (10). Перехідна функція першого порядку  $\hat{h}_1(t)$ , та діагональний перетин перехідної функції другого порядку  $\hat{h}_2(t,t)$  наведено на рис. 22.

Відгуки моделі на основі перехідних характеристик першого і другого порядку наближено описується формулою (11).

Порівняння відгуку побудованої моделі з експериментальними даними – відгуком об'єкта ідентифікації  $y(t)$  – представлено на рис. 23.

Верифікація побудованої моделі застосування цифрового маркетингу показала адекватність її досліджуваному об'єкту: процентна нормована середньоквадратична помилка (19)  $\varepsilon_n = 7.2\%$ , що підтверджує точність методу непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних ОД на основі БПФ з використанням тестових ступінчастих сигналів.

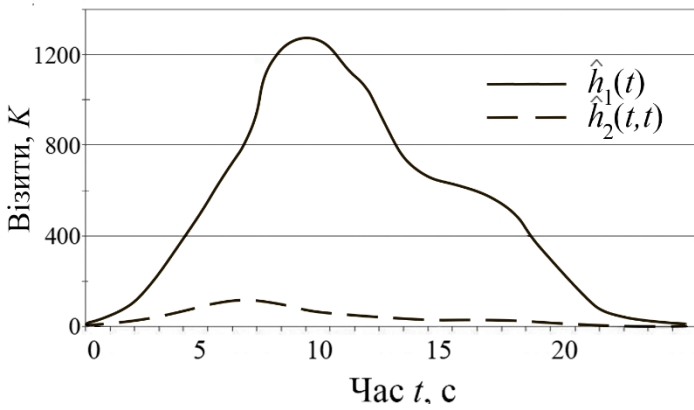


Рисунок 22. Перехідна функція першого  $\hat{h}_1(t)$  та другого  $\hat{h}_2(t,t)$  порядку

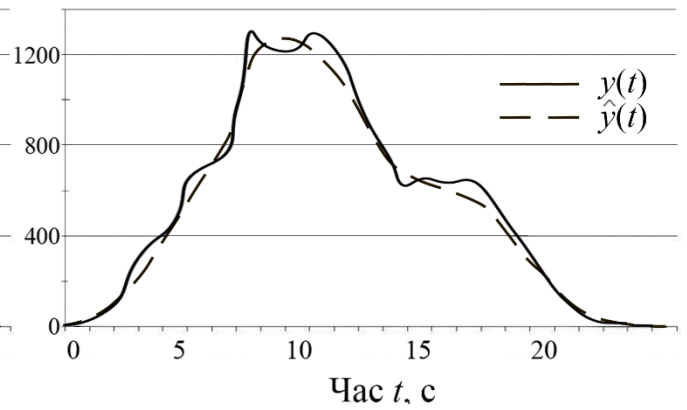


Рисунок 23. Порівняння відгуків  $y(t)$  і моделі  $\hat{y}(t)$

## ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих в дисертації результатів вирішує актуальну науково-технічну проблему підвищення достовірності та оперативності діагностування шляхом розвитку теоретичних основ побудови діагностичних моделей, розробки методів та базової інформаційної технології вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів різної природи в процесі створення новітніх систем технічної діагностики.

На основі проведених досліджень отримано наступні наукові результати, які складають істотний внесок у подальший розвиток теорії діагностування нелінійних інерційних об'єктів типу «чорний ящик», застосування інтегральних непараметричних динамічних моделей ОД, методів їх ідентифікації та редукції.

1. Виконано аналіз проблеми побудови моделей неперервних нелінійних інерційних ОД в системах технічної діагностики, що дозволило обрати та обґрунтувати підхід до застосування інтегральних непараметричних динамічних моделей на основі БВФ та БПФ для первинного опису об'єктів різної природи, що забезпечує достовірність діагностування в умовах зміни області використання або інших режимах функціонування; виконано аналіз сучасного стану методів редукції інформаційних моделей, що дозволило обрати та обґрунтувати підхід до побудови діагностичних моделей на основі вторинної спектрально-статистичної ідентифікації ОД та процедури інформаційної оптимізації при створенні АСТД.

2. Розроблено новий метод детермінованої непараметричної ідентифікації багатовимірних нелінійних інерційних ОД типу «чорний ящик» на основі БПФ, отриманих за даними активного експерименту «вхід–вихід» із використанням тестових багатоступінчастих сигналів. Перевагою розробленого методу ідентифікації у порівнянні з іншими методами є спрощений алгоритм генерації тестових сигналів та простота обробки експериментальних даних, що дозволяє мінімізувати методичні похибки ідентифікації, зменшити об'єм обчислень, підвищити точність та оперативність ідентифікації ОД.

Розроблений метод адаптовано до застосування для ідентифікації технічних, біологічних об'єктів та економічних процесів шляхом визначення та підбору тестових імпульсних впливів. Використання методу для ідентифікації характеристик

біологічних об'єктів (дослідження ОРА) та економічних процесів (моделювання маркетингових заходів і рекламних кампаній) дозволило збудувати інформаційні моделі з одночасним урахуванням інерційних і нелінійних властивостей ОД на основі експериментальних даних «вхід–вихід» з забезпеченням прийнятної точності: на 5-7% вище у порівнянні з лінійними моделями.

3. Розвинено метод побудови діагностичних моделей ОД у вигляді спектральних перетворень БВФ та БПФ: сукупності відліків багатовимірних АЧХ та ФЧХ, розкладання Карунена-Лоева, коефіцієнтів вейвлет-перетворень і моментів БВФ та БПФ першого порядку, діагональних та піддіагональних перетинів БВФ та БПФ вищих порядків.

Запропоновано використання діагностичних моделей у вигляді об'єднання БВФ та БПФ першого, другого і третього порядків. Ці моделі забезпечують найвищу достовірність діагностування у порівнянні з моделями на основі БВФ та БПФ першого, другого або третього порядків. Надані рекомендації до вибору завадостійких діагностичних моделей в умовах дії завад.

4. На базі запропонованих моделей і розроблених методів створено базову інформаційну технологію вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в системах технічної діагностики та інструментальні засоби сервіс-орієнтованої АСТД, що ґрунтується на первинному описі ОД на основі інформаційних моделей у вигляді послідовності БВФ та БПФ, побудові діагностичних моделей з подальшою інформаційною оптимізацією за допомогою методів машинного навчання за критерієм максимуму достовірності діагностування.

Розроблена технологія забезпечує високу достовірність та оперативність діагностування при розширенні сфери практичних застосувань та функціональних вимог, експлуатації у широкому діапазоні зовнішніх умов, що призводить до зростання апріорної невизначеності даних про об'єкт.

5. Побудовано апроксимаційну модель вентиляно-реактивного двигуна у вигляді БВФ першого і другого порядків з метою діагностування його поточного стану. Визначено найбільш цінні для діагностування інформаційні моделі: перетини БВФ другого порядку забезпечують більшу достовірність діагностування, ніж БВФ першого порядку на 8-12%.

Встановлено, що моменти БВФ другого порядку мають найбільшу стійкість показника достовірності діагностування до похибок оцінки БВФ. Це дозволяє рекомендувати для практичного використання БВФ другого порядку як ефективне джерело первинних даних при побудові діагностичних моделей ВРД.

У результаті численних експериментів з діагностування станів ВРД використання розроблених діагностичних моделей у вигляді моментів та коефіцієнтів вейвлет-перетворень БВФ дозволило підвищити достовірність діагностування станів на 7% у порівнянні з дискретними відліками БВФ.

6. Розроблено метод діагностування станів кінцевих та торцевих фрез на основі непрямих вимірювань з використанням тестових та функціональних імпульсних впливів на систему різання у вигляді навантажень з ударами та реєстрації відгуків системи, на основі яких будуються інтегральні інформаційні моделі у вигляді БВФ в якості джерела первинної діагностичної інформації. Метод дозволяє підвищити достовірність діагностування станів ріжучих інструментів на 4–6% та оперативність

діагностування в 1,5–3 рази у порівнянні з системою технічного зору, заснованою на прямих вимірюваннях геометричних параметрів зони зносу.

7. Запропоновано метод побудови багатовимірної моделі ОРА людини, яка враховує його інерційні та нелінійні властивості у вигляді БПФ з використанням тестових багатоступінчастих сигналів, на основі даних експериментів «вхід-вихід».

На основі експериментальних даних із застосуванням розробленого методу отримано непараметричну динамічну модель ОРА людини у вигляді перехідної і двовимірної перехідної функції. Дослідження точності побудованої моделі демонструє практичний збіг (в межах прийнятної похибки 5%) відгуків об'єкту і моделі при одному і тому ж тестовому впливі.

В процесі порівняльного аналізу результатів ідентифікації моделей ОРА встановлено перевагу у точності запропонованої моделі перед об'єктно-орієнтованою інформаційною моделлю на 5-7%.

8. На основі даних «вхід-вихід», отриманих за допомогою web-сервісів Google AdWords та Google Analytics отримано непараметричну динамічну модель маркетингових заходів і рекламних кампаній в мережі інтернет. Отримана модель має переваги в точності перед статистичними моделями до 7%.

Результати досліджень пройшли цільові випробування та впроваджені на 7 підприємствах: ТОВ «Оліс» (м. Одеса), ТОВ «Нафтогазхім сервіс» (м. Одеса), ПрАТ «Уманьферммаш» (м. Умань), ТОВ «НВЦ «АВТЕХ» (м. Одеса), ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім. В. П. Філатова НАМН України» (м. Одеса), в ТОВ «Ревера Груп» (м. Одеса), в ТОВ «Перша ріелторська компанія» (м. Одеса); в навчальному процесі ОНПУ та ОНМА.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації*

1. Фомін О. О. Модельно-орієнтована інформаційна технологія діагностування НДС в умовах неповної апріорної інформації // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Київ, 2018. – Том 29 (68), № 3. – С. 24 – 29. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International.*

2. Фомін О. О. V-модель процедури діагностування в умовах неповної апріорної інформації // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2018. – Том 8, №2. – С. 103–109. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus International.*

3. Фомін О. О. Формування простору діагностичних ознак на основі перетинів ядер Вольтерра // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. 17. – С. 141– 150.

4. Фомін О. О. Метод побудови простору діагностичних ознак на основі інтегральних динамічних моделей // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2018. – Том 29 (68), № 1. – С. 43 – 47. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International.*

5. Филоненко Е. М., Фомин А. А., Рубан А. Д. Использование сверточных нейронных сетей для выделения информативных признаков влияющих на качество дистанционного обучения // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2018. – №28

(104). – С. 268 – 274. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *Index Copernicus International, Electronic Journals Library*.

6. Фомін О. О. Інтернет-аналітика цифрового маркетингу // Цифровий маркетинг – модель маркетингу ХХІ сторіччя: монографія / під ред. М. А. Окландера. – Одеса: Астропринт, 2017. – С. 224 – 266.

7. Fomin O., Masri M., Pavlenko V. Intelligent Technology of Nonlinear Dynamics Diagnostics using Volterra Kernels Moments // International journal of mathematical models and methods in applied sciences.– 2016. – Volume 10. – P. 158 – 165. Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Scopus*.

8. Fomin O. O., Pavlenko V. D. Model-oriented method for construction of intelligent information systems of diagnosing based on Volterra kernels // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – С. 146 – 153. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *Index Copernicus International, Electronic Journals Library*.

9. Pavlenko V. D., Fomin O. O., Fedorova A. N., Dombrovskiy M. M. Identification of Human Eye-Motor System Base on Volterra Model // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інформатика і моделювання. – 2016. – №21 (1193). – P. 74 – 85. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *ISSN, Index Copernicus International, Open Academic Journals Index*.

10. Pavlenko V., Fomin O. Intelligent information technology building systems diagnostics using nuclear moments Volterra // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання. – 2015. – №33 (1142). – С. 105 – 118. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *ISSN, Index Copernicus International, Open Academic Journals Index*.

11. Фомин А. А., Павленко В. Д., Фёдорова А. Н. Метод построения многомерной модели Вольтерра глазо-двигательного аппарата // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2015. – №19 (95). – С. 296 – 302. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *Index Copernicus International, Electronic Journals Library*.

12. Фомин А. А., Масри М. М., Павленко В. Д., Фёдорова А. Н. Метод и информационная технология построения непараметрической динамической модели глазо-двигательного аппарата // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Том 4, вып. 2/9 (74). – С. 64 – 69. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *Scopus, Index Copernicus International, ResearchBib, CiteFactor, Directory of Open Access Journals, Directory of Research Journals Indexing*.

13. Григоренко С. Н., Павленко С. В., Павленко В. Д., Фомин А. А. Информационная технология диагностирования состояний электродвигателей на основе моделей Вольтерра // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Вып. 11 (70). – С. 38 – 43. Видання включено до міжнародних наукометричних баз: *Index Copernicus International, ResearchBib, CiteFactor, Directory of Open Access Journals, Directory of Research Journals Indexing*.

14. Polozhaenko S. A., Fomin A. A. A technique to solve the problem of parametric identification of mathematical models of anomalous fluids filtration processes in porous media // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2014. – Том 4, №3. – С. 219 – 224. Видання включено до міжнародної наукометричної бази: *Index Copernicus International*.



15. Деревянченко А. Г., Павленко В. Д., Фомин А. А., Павленко С. В., Бовнегра Л. В. Интеллектуальные системы распознавания состояний режущих инструментов: монография. – Одесса: Астропринт, 2013.

16. Деревянченко А. Г., Фомин А. А., Фомина О. В. Повышение качества системы поддержания работоспособности инструментов с использованием нечеткого нейросетевого классификатора их состояний // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Машинобуд. і машинознавство. – 2010. – Вип. 7. – С. 177 – 184.

17. Деревянченко А. Г., Бовнегра Л. В., Криницын Д. А., Косс Е. В., Фомин А. А. Система контроля и методы распознавания состояний резцов для поддержания их работоспособности // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Машинобуд. і машинознавство. – 2009. – Вип. 6 (154). – С. 87 – 94.

18. Павленко В. Д., Фомин О. О., Павленко С. В., Ильин В. М. Метод диагностики непрерывных систем на основе моделей в виде ядер Вольтерра // Збірник наукових праць «Моделювання та керування станом еколого-економічних систем». – 2008. – Вип. 4. – С. 180 – 191.

19. Деревянченко А. Г., Фомин А. А., Криницын Д. А., Бовнегра Л. В. Формирование диагностической информации для систем поддержания работоспособности режущих инструментов. // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Машинобуд. і машинознавство. – 2008. – Вип. 5 (139). – С. 101 – 106.

20. Деревянченко А. Г., Павленко В. Д., Фомин А. А., Криницын Д. А., Бовнегра Л. В. Концепция создания экспертной системы для информационного обеспечения многоуровневого автоматизированного диагностирования состояний инструментов // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – 2008. – Вип. 1 (16). – С. 94 – 103.

21. Деревянченко А. Г., Павленко В. Д., Фомин А. А., Бовнегра Л. В., Павленко С. В. Методы и средства построения классификатора состояний режущих инструментов // Современные технологии в машиностроении. – 2007. – С. 46 – 55.

22. Павленко В. Д., Фомин А. А. Информационная технология диагностики нелинейных динамических объектов с использованием рядов Вольтерра // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – 2007. – №5. – С. 67 – 74.

23. Павленко В. Д., Фомин А. А. Информационная технология модельной диагностики нелинейных динамических объектов // Информационные системы и технологии, приложение к журналу «Холодильная техника и технология». – 2006. – С. 57 – 64.

#### **Опубліковані праці апробаційного характеру**

24. Балихін О. В., Булас К. С., Фомін О. О. Розробка eye-tracking обладнання для моделювання око-рухового апарату людини // Восьма Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології 2018». – Одеса. – 2018. – С. 124 – 125.

25. Рубан А. Д., Федорова Г. М., Фомин А. А. Определение положения зрачка при помощи сверточной нейронной сети // Восьма Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології 2018». – Одеса. – 2018. – С. 112 – 113.



26. Філоненко К. М., Фомін О. О., Рубан О. Д. Використання згортальних нейронних мереж для виділення інформативних ознак, що впливають на якість дистанційного навчання // 8-а Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації». – Кам'янець-Подільський. – 2018. – С. 46 – 47.

27. Філоненко К. М., Фомін О. О. Оцінка значущості ознак на основі нейронних мереж в задачах аналізу якості дистанційного навчання // Восьма Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології 2018». – Одеса. – 2018. – С. 162 – 163.

28. Medvedew A., Fomin, O., Pavlenko, V., Speranskyu, V. Diagnostic features space construction using Volterra kernels wavelet transforms // Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – 2017. – P. 1077 – 1081. *Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, Web of Science.*

29. Фомін О. О., Павленко В. Д. Модельно-орієнтована інформаційна технологія побудови систем діагностування нелінійних динамічних об'єктів // Проблеми інформатики и моделирования (ПИМ-2017). – Харьков-Одесса (Каролино-Бугаз). – 2017. – С. 91.

30. Medvedew A. A., Fomin A. O., Speranskiy V. O. The diagnostic of retinal diseases by dint of convolutional neural networks» // Сьома міжнародна конференція студентів та молодих науковців «Сучасні інформаційні технології (МІТ-2017)». – Одеса. – 2017. – С. 136 – 137.

31. Fomin O. O., Pavlenko V. D. Feature Space Building for Nonlinear Systems Diagnostics based on Wavelet Transforms of Integral Models // System analysis and information technology: 18-th International conference SAIT 2016. – Kyiv. – 2016. – P. 30 – 31.

32. Fomin O., Pavlenko V. Construction of diagnostic features space using Volterra kernels moments // 20th International Conference «Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)». – Miedzyzdroje.– 2015. – P. 1022 – 1027. *Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, Web of Science.*

33. Fomin O., Medvedev A., Pavlenko V. Technology of Intelligent Diagnostics Based on Volterra Kernels Moments // IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – Warsaw. – 2015. – P. 796 – 801. *Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, Web of Science.*

34. Fomin O., Pavlenko V., Kravchenko E. Information technology of switched-reluctance motors diagnostics using Volterra kernels moments // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – Gothenburg. – 2015. – P. 1589 – 1593.

35. Fomin O., Masri M. Pavlenko V. Method of Building an Intelligent Computing Systems for Diagnostics using Volterra Kernels Moments // Advances in Information Science and Computer Engineering. 9th International Conference on Computer Engineering and Applications (CEA–2015). – Dubai. – 2015. – P. 52 – 56.

36. Fomin O. O., Pavlenko V. D. Construction of Diagnostic Features Space using Volterra Kernels Moments // П'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатики моделювання». – Харків.– 2015. – Р. 66.

37. Fomin O. O., Pavlenko V. D., Masri M. M. Construction intelligent computing systems for diagnostics complex dynamical objects using Volterra kernels // Intellectual systems for decision making and problems of computational intelligence (ISDMCI'2015). – Kherson.– 2015. – Р. 241 – 243.

38. Fomin O., Pavlenko V. Building an intelligent computing systems for diagnostics using Volterra kernels // Міжнар. наук.-практ. конф. «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)». – Київ-Черкаси.– 2015. – Р. 153 – 154.

39. Фёдорова А. Н., Павленко В. Д., Фомин А. А. Построение непараметрической модели движения глаза на основе данных отслеживания поведения зрачка // Третя українсько-німецька конференція «Інформатика. Культура. Техніка». – Одеса. – 2015. – С. 51 – 52.

40. Федорова А. Н., Фомин А. А., Павленко В. Д. Технология отслеживания поведения зрачка при помощи видео регистрации // П'ята міжнародна конференція студентів та молодих науковців «Сучасні інформаційні технології (МІТ-2015)». – Одеса. – 2015. – С. 95 – 96.

41. Fomin O., Pavlenko V. Wavelet-transformation of Volterra kernels for features space dimension reduction in nonlinear systems diagnostics // The international conference «Wavelets and Applications». – St. Petersburg.– 2015. – Р. 35 – 36.

42. Федорова А. Н., Павленко В. Д., Фомин А. А. Моделирование глазодвигательного аппарата в задачах медицинской диагностики // Четверта міжнародна конференція студентів та молодих науковців «Сучасні інформаційні технології (МІТ-2014)». – Одеса.– 2014. – С. 64 – 65.

43. Деревянченко А. Г., Фомин А. А., Фомина О. В., Фроленкова О. В. Подход к разработке интеллектуальной системы диагностирования состояний режущих инструментов с использованием интернет-технологий // Научно-техническая конференция «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении». – Одесса.– 2014. – С. 158 – 161.

44. Pavlenko V., Fomin O., Pavlenko S., Grigorenko Y. Identification Accuracy of Nonlinear System based on Volterra Model in Frequency Domain // Conference on Intelligent Systems and Control. AASRI Procedia. – 2013. – Р. 297 – 305. *Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Science Direct.*

45. Pavlenko V., Fomin O., Ilyin V. Technology for Data Acquisition in Diagnosis Processes By Means of the Identification Using Models Volterra // 5th IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009). – Rende (Cosenza). – 2009. – Р. 327 – 332. *Видання включено до міжнародних наукометричних баз: Scopus, Science Direct.*

46. Фомин А. А., Деревянченко А. Г., Бовнегра Л. В., Гнатюк А. П., Распознавание классов формоизменения режущих кромок и рабочих поверхностей резцов при их износе // 15 междунар. науч.-техн. конф. «Физ. и компьютер. технологии». – Харьков. – 2009. – С. 172 – 176.

47. Pavlenko V., Fomin O. Method for Modeling and Fault Simulation using Volterra kernels // 6th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'08). – Lviv. – 2008. – P. 204 – 207.

48. Pavlenko V., Fomin O. Methods For Black-Box Diagnostics Using Volterra Kernels // ICIM 2008: 2nd International Conference on Inductive Modelling. – Kyiv. – 2008. – P. 104 – 107. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази ResearchGate.*

49. Павленко В. Д., Фомин А. А. Средства построения диагностических моделей непрерывных объектов контроля на основе многомерных весовых функций // Восьмая международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии». – 2007. – С. 108.

50. Фомин А. А., Деревянченко А. Г., Криницький Д. А., Гнатюк Е. В. Применение генетических алгоритмов для формирования пространства признаков состояний инструментов // Сьома Всеукраїнська науково-технічна конференція «Машинобуд. України очима молодих: прогрес. ідеї – наука – вир-во». – Одеса. – 2007. – С. 4.

51. Деревянченко А. Г., Павленко В. Д., Фомин А. А., Криницький Д. А. Подход к использованию генетических алгоритмов для формирования пространства признаков состояний инструментов // VI наук.-техн. конф. «Приладобуд. – 2007: стан і перспективи». – Київ. – 2007. – С. 101 – 102.

**Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

52. Fomin O. O. Marketing processes modeling using integrated dynamic models // Маркетинг і цифрові технології. – 2018. – Том 2, № 1. – С. 74 – 82. *Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International.*

53. Антошук С. Г., Фомин О. О. Модель маркетингу, яка керується даними // Маркетинг і цифрові технології. – 2017. – Том 1, № 2. – С.92 – 101.

54. Павленко В. Д., Фомин А. А. Информационная технология модельной диагностики нелинейных объектов // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2011. – Том 1, №1. – С. 57 – 65.

## АНОТАЦІЯ

**Фомин О.О. Інформаційна технологія вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів в системах технічної діагностики. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми підвищення достовірності та оперативності діагностування на базі інформаційної технології вторинної спектрально-статистичної ідентифікації неперервних нелінійних інерційних об'єктів різної природи в системах технічної діагностики.

На основі запропонованого підходу розроблено і досліджено методи непараметричної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів типу «чорний ящик» у вигляді багатовимірних перехідних функцій, запропоновано сімейство діагностичних моделей нелінійних інерційних об'єктів на основі спектральних перетворень перетинів багатовимірних вагових функцій для стиснення простору

ознак та статистичних методів машинного навчання моделей в отриманих діагностичних просторах.

На базі цих моделей та методів розроблено інформаційну технологію вторинної спектрально-статистичної ідентифікації нелінійних інерційних об'єктів на основі інтегральних непараметричних динамічних моделей в умовах неповної апіорної інформації. Отримані результати доведені до практичної реалізації у вигляді інструментальних засобів автоматизованої системи технічного діагностування нелінійних інерційних об'єктів різної природи.

**Ключові слова:** технічна діагностика, неперервні інерційні об'єкти, інформаційні моделі, діагностичні моделі, інформаційні технології, багатовимірні вагові та перехідні функції, ідентифікація, класифікація.

## ABSTRACT

**Fomin O.O. Information technology of secondary spectral and statistical identification of nonlinear inertial objects in technical diagnostic systems. – Manuscript.**

The thesis presented for the degree of a Doctor of Technical Sciences, specialty 05.13.06 – Information Technologies. – Odessa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2019.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical problem of increasing the diagnosing reliability and efficiency by development of theoretical bases, models, methods and base information technology of secondary spectral and statistical identification of nonlinear inertial objects in the creation of process newest systems of technical diagnostics.

Based on the theoretical and experimental research, new effective models, methods and computational algorithms for building information technology of secondary spectral and statistical identification of nonlinear inertial objects are developed. Information technology uses the integral dynamic models in time and frequency domains under conditions of incomplete a priori information.

The method of nonlinear inertial objects diagnosing is developed. The method based on information models using in the form of multidimensional weighting functions and multidimensional transfer functions as a source of diagnostic information. It differs from the known methods by feedback presence at the stages of identification results verification, the diagnostic models construction and the construction of a classifier allowing to carry out purposeful diagnostic models overview based on the criterion of maximum reliability of diagnostics.

The V-model of the diagnostic procedure is proposed. In this model the stages of the development proceed of system using the information model identification and the construction of the diagnostic model to the details of the classifier of states; the stages of assessing the accuracy of the models and the reliability of the diagnosis go in the opposite direction. The iterations of the system construction are executed between the respective stages of both directions, which reduces the number of global cycles by increasing local loops and accelerating the selection of the model with the most valuable diagnostic value.

The method for determining (nonparametric) identification of multidimensional nonlinear inertial diagnostic objects based on multidimensional weighting functions and multidimensional transfer functions is obtained from the input-output experiment using multi-step test signals. The developed method differs from the known methods by the allocation of partial components from the responses and the determination of their basis based on the multidimensional weighting functions and multidimensional transfer functions.

A family of diagnostic models of nonlinear inertial diagnostical objects in the form of integral transformations of subdiagonal sections of the multidimensional weighting functions and multidimensional transfer functions are proposed. The models allow taking into account the diagnostic information dispersed throughout the hypersurface of the multidimensional weighting functions in the observed area of determination that, unlike the use of diagonal intersections, allows constructing the diagnostic models that provide greater reliability of diagnosis. At the expense of the most complete use of the initial description of objects information; a family of diagnostic models of nonlinear inertial diagnostic objects in the form of an association of features sets obtained on the basis of different orders information models is proposed. There are first order of multidimensional weighting functions, second and third order of multidimensional transfer functions diagonal and subdiagonal sections, in contrast to the use of separate multidimensional weight functions cross sections, allows to construct the valuable diagnostic models. This models provide greater reliability of diagnostics at the expense of the most complete use of the information of the initial description of objects.

The most valuable diagnostic models of nonlinear inertial objects in the form of integral transformations of the multidimensional weight functions with the action of additive fluctuation interferences are established. There are a set of coefficients of wavelet-transformations and moments of the multidimensional weight functions of different orders, which allows constructing diagnostic models that provide greater reliability of diagnosis in problems with a priori uncertainty due to the presence of disturbing influences and environmental impediments.

The family of diagnostic models of the valve-jet engine in the form of integral transformations of the diagonal and subdiagonal sections of the multidimensional transfer functions is proposed. The models, unlike the existing, allows increasing the reliability and impedance of diagnostics by simultaneously taking into account the nonlinear and inertial properties of the diagnostic object. It is established that the diagonal cross sections of the second order multidimensional weighting functions represent the greatest diagnostic value and can be used as a source of primary data when constructing diagnostic models.

The method of constructing a family of spectral and statistical diagnostic models in the form of integral transformations of the multidimensional weighting functions (moments, Fourier-images, transformations of Karunen-Loev and wavelet transformations of the multidimensional weighting functions) is improved. The difference of method from the known is the use of a plurality of subdiagonal sections of the multidimensional weighting functions, which allows for the diagnostic information distributed throughout the hypersurface of the multidimensional transfer functions in the observed area of determination and increase the reliability of the diagnosis under conditions of incomplete a priori information about the diagnostic object.

The effectiveness of the developed methods and corresponding instrumental tools are confirmed by diagnostic researches of technical, economic and biological objects in industry and research organizations. There are construction of the diagnostic model of the valve-jet engine, construction of diagnostic models of the cutting tool of metalworking machines, the construction of a nonlinear dynamic model of the oculomotor apparatus, construction of a nonlinear dynamic model market of in the marketing problems.

**Keywords:** technical diagnostics, continuous inertial objects, information models, diagnostic models, information technologies, multidimensional weighting and transfer functions, identification, classification.

## АННОТАЦИЯ

**Фомин А. А. Информационная технология вторичной спектрально-статистической идентификации нелинейных инерционных объектов в системах технической диагностики. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. – Одесский национальный политехнический университет Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2019.

Диссертация посвящена решению проблемы повышения достоверности и оперативности диагностирования на базе информационной технологии вторичной спектрально-статистической идентификации непрерывных нелинейных инерционных объектов различной природы в системах технической диагностики.

На основе предложенного подхода разработаны и исследованы методы непараметрической идентификации нелинейных инерционных объектов типа «черный ящик» в виде многомерных переходных функций, предложено семейство диагностических моделей нелинейных инерционных объектов на основе спектральных преобразований сечений многомерных весовых функций для сжатия пространства признаков и статистических методов машинного обучения моделей в полученных диагностических пространствах.

На базе этих моделей и методов разработана информационная технология вторичной спектрально-статистической идентификации нелинейных инерционных объектов на основе интегральных непараметрических динамических моделей в условиях неполной априорной информации. Полученные результаты доведены до практической реализации в виде инструментальных средств автоматизированной системы технического диагностирования нелинейных инерционных объектов различной природы.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, непрерывные инерционные объекты, информационные модели, диагностические модели, информационные технологии, многомерные весовые и переходные функции, идентификация, классификация.