

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Юзефовича Романа Михайловича

“Моделювання та статистичний аналіз взаємопов’язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів для виявлення дефектів механізмів”, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертації

Ефективним методом, що широко використовується при розв’язанні задач технічної діагностики, є статистичний аналіз зареєстрованих сигналів, який ґрунтується на спектральній та кореляційній теоріях. При визначенні характеристик вібраційних сигналів одним з найважливіших етапів, що обумовлюють подальший напрям досліджень, є вибір адекватної до поставленої задачі їх математичної моделі.

Дослідження, проведені у лабораторії вібродіагностики в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, показали, що використання імовірнісної моделі цих сигналів у вигляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) відкриває нові можливості при діагностиці дефектів обертових механізмів на ранніх стадіях їх виникнення. У таких випадках вібраційний сигнал розглядається як сума детермінованої, стаціонарної та нестационарної випадкових складових. Детермінована складова описує загальний стан механізму, зокрема розбалансованість, неспіввісність, еліптичність валів тощо. Стаціонарна описує фонові шуми, що виникають в системі, а нестационарна – обумовлена наявністю дефектних елементів, що є в динамічній системі.

Однією з типових діагностичних задач є задача багатовимірного аналізу вібрацій. Для розв’язання такої задачі слід визначати та аналізувати взаємні амплітудні і фазові спектри вібрацій, що містять інформацію про просторові властивості вібраційних коливань. При розв’язанні вказаних діагностичних задач доцільно використовувати розроблені у дисертаційній роботі методи взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів.

Все це обумовлює актуальність вирішення важливої науково-прикладної проблеми розроблення методів взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів при відомому і невідомому періоді нестационарності.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Адекватність розроблених у роботі методів взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів підтверджена відповідними результатами як симуляційних, так і натурних експериментів.

Достовірність одержаних в дисертації результатів і висновків забезпечується математичною строгістю формулювань задач з використанням основних положень теорії випадкових процесів, математичної та прикладної статистики, методів статистичної теорії багатовимірних періодично нестационарних випадкових процесів, методів обчислювальної математики, методів розв'язування нелінійних рівнянь, методу малого параметру, комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертаційній роботі вперше вирішено важливу науково-прикладну проблему розроблення методів взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів при відомому і невідомому періоді нестационарності; обґрунтовані функції когерентності для кількісного опису взаємозв'язків між періодично нестационарними властивостями сигналів, що дало можливість виявляти дефекти механізмів на ранніх стадіях їх розвитку, проводити їх локалізацію та встановлювати типи.

У роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено спектрально-кореляційну теорію та методи дослідження взаємопов'язаних періодично корельованих випадкових процесів, що дало можливість встановити особливості представлень імовірнісних характеристик сигналів рядами Фур'є та проаналізувати їх зв'язок з характеристиками випадкових процесів, що описують амплітудну та стохастичну модуляції несучих гармонік вібросигналів.

2. Вперше впроваджено і обґрунтовано інтегральну та покомпонентну функції когерентності, що дало можливість отримати кількісний опис взаємозв'язку між властивостями нестационарності ПКВП-сигналів; доведено, що введені функції не змінюються при лінійних перетвореннях.

3. Розвинуто методи когерентного взаємокореляційного аналізу ПКВП-сигналів, що ґрунтується на усередненні відліків їх реалізацій через період нестационарності, які дали можливість визначити умови асимптотичної незміщеності та слухності неперервних і дискретних оцінок взаємної кореляційної функції та взаємокореляційних компонентів та встановити умови відсутності ефектів накладання першого і другого роду.

4. Вперше отримано компонентні оцінки взаємної кореляційної функції, які визначаються на основі тригонометричного полінома, коефіцієнти якого обчислюють за допомогою як неперервних, так і дискретних перетворень Фур'є скінченних відрізків реалізацій сигналів, встановлено умови їх середньоквадратичної збіжності.

5. Розроблено теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємного спектрального аналізу ПКВП-сигналів з використанням корелограмного методу, який є узагальненням методу Блекмана-Тьюкі, що дало можливість оцінювати взаємну спектральну густину і взаємні спектральні компоненти, а також довести слушність оцінок.

6. Узагальнено когерентний і компонентний методи взаємного кореляційного аналізу на випадок, коли період нестационарності є невідомим, що дало можливість довести, що точки екстремальних значень статистик відносно пробного періоду є асимптотично незміщеними і слушними оцінками періоду, а самі величини цих екстремумів збігаються в середньоквадратичному до взаємних кореляційних функцій чи взаємних кореляційних компонентів.

7. Вперше встановлено характерні особливості взаємокореляційної та взаємоспектральної структур вібраційних сигналів обертових вузлів промислових об'єктів при наявності дефектних елементів та показано, що введені інтегральна та покомпонентна функції когерентності дають можливість виявити дефекти на ранніх стадіях їх зародження, розділити та локалізувати їх, а також встановити типи.

Практичне та наукове значення роботи

На основі отриманих теоретичних результатів та розроблених методів створено програмне забезпечення, що дає змогу обчислювати весь комплекс спектрально-кореляційних характеристик коливань, які достатньо повно описують їх структуру. Визначення введених інтегральної і покомпонентної функцій когерентності дає можливість кількісно охарактеризувати взаємозв'язаність між властивостями нестационарності стохастичних коливань, яка проявляється в періодичній зміні їх імовірнісних характеристик, а також взаємозв'язку між амплітудою та фазовими модуляціями несучих гармонік стохастичних коливань, що є важливим для встановлення їх фізичної природи. Статистична обробка вібраційних сигналів цілого ряду дефектних механізмів показала високу ефективність використання для цього частотних залежностей введених функцій когерентності.

Практичну цінність створеного програмного забезпечення, що було використано при розробці вібродіагностичної системи ПУЛЬС, підтверджують результати його практичного використання при проведенні діагностичних робіт на ряді підприємств України, що підтверджено відповідними актами.

Наукові результати отримані дисертантом при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України у лабораторії вібродіагностики, в рамках програми “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” (РЕСУРС) та в рамках цільової програми наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (РЕСУРС-2), а також при виконанні госпдоговірної тематики впродовж 2008–2016 рр. Також дисертантом одержано практичні результати при виконанні науково-дослідних робіт з госпдоговірної тематики.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах

За основними матеріалами роботи опубліковано 79 наукових праць, у тому числі: 2 розділи у закордонних колективних монографіях, 7 статей у періодичних виданнях інших держав, 32 статті у фахових виданнях України, 2 патенти, 4 статті в інших виданнях, 32 публікації у збірниках матеріалів і праць конференцій.

Матеріали дисертації пройшли достатню апробацію, вони доповідались автором на наукових семінарах та конференціях. Автореферат правильно і з достатньою повнотою відображає основний зміст дисертації. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідальності до вимог МОН України. Виклад матеріалу дисертації супроводжується всіма необхідними посиланнями в тексті роботи на першоджерела та запозичення з праць інших дослідників. Дисертація та автореферат написані державною мовою, грамотно, чітко, послідовно, на високому професійному рівні. Основні наукові положення, практичні результати коректно та логічно сформульовано і представлено у зрозумілій формі.

Структура та зміст дисертації

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, показано зв'язок із науковими програмами, планами, темами, висвітлено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

У **другому розділі** представлено основи спектрально-кореляційної теорії взаємопов'язаних періодично корельованих випадкових процесів – математичних моделей вібраційних сигналів. Для кількісної характеристики такого зв'язку введені інтегральна і покомпонентна функції когерентності і доведено, що вони не змінюються при лінійних перетвореннях сигналів, тобто володіють властивістю інваріантності, яка дає можливість використовувати введені величини при виявленні нелінійних спотворень сигналів, які мають місце при виникненні дефектів. Також у розділі розглянуто алгоритми

виділення окремих модулюючих процесів, які ґрунтуються на переносі частот і низькочастотній фільтрації, наведено приклади такого виділення.

У **третьому розділі** подано основи когерентного взаємкореляційного аналізу ПКВП-сигналів, який ґрунтується на усередненні відліків їх реалізацій, які відбираються через період нестационарності. Отримано формули для зміщення й дисперсії оцінок, проведено їх аналіз, виведено умови їх асимптотичної незміщеності і слухності. З метою обґрунтованого вибору інтервалу дискретизації проведено аналіз дискретних оцінок взаємкореляційних компонентів. Показано, що дискретизація приводить до збільшення як систематичної, так і випадкової похибок оцінювання, що в значній мірі зумовлено ефектами накладання першого й другого роду. Для вибраних апроксимацій авто- та взаємкореляційних функцій модулюючих процесів отримані залежності статистичних характеристик оцінок від довжини відрізка реалізації, кроку дискретизації, а також параметрів сигналів. Проаналізовано на основі таких залежностей вплив нестационарності сигналів на похибки оцінювання.

Четвертий розділ дисертації присвячено аналізу компонентних оцінок взаємкореляційної функції. Показано, що компонентний метод оцінювання можна застосовувати тоді, коли є відомими кількість гармонічних складових взаємкореляційної функції, а також математичне сподівання. У розділі отримано та проаналізовано формули для визначення статистичних характеристик дискретних компонентних оцінок взаємкореляційної функції. Показано, що вирішальний вплив на ефективність дискретних оцінок має гармонічний склад тієї чи іншої характеристики та швидкість зникання кореляційних зв'язків. Досліджено ефекти накладання першого і другого роду та отримано умови їх відсутності. При виконанні таких умов виведено формули для коефіцієнтів Фур'є зміщення та дисперсії, які дають можливість обчислити систематичну похибку оцінки та її середньоквадратичне відхилення у залежності від кроку дискретизації, величини вибірки та точки усереднення корелограми і на цій основі провести обґрунтований вибір параметрів обробки.

У **п'ятому розділі** розглянуто теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємспектрального аналізу ПКВП-сигналів. Для оцінювання миттєвої взаємспектральної густини обґрунтовано корелограмний метод, який є узагальненням на випадок взаємопов'язаних ПКВП-сигналів методу Блекмана-Тьюкі. Оцінка взаєм-спектральної густини знаходиться при такому підході на основі згладженого перетворення Фур'є оцінки взаємкореляційної функції. Показано, що емпіричний взаємспектральний аналіз стаціонарного наближення ПКВП аж ніяк не може бути проведений в рамках стаціонарних моделей, а тільки в рамках тих ПКВП, наближеними яких вони є. У розділі розглянуто також компонентний метод взаємспектрального аналізу, при якому оцінка

взаємкореляційної функції представляється у вигляді тригонометричного полінома. Проведено порівняльний аналіз ефективності когерентних та компонентних оцінок, а також дискретного й компонентного оцінювання.

У **шостому розділі** розвинуто методи взаємного статистичного аналізу ПКВП-сигналів при невідомому періоді нестационарності. Доведено, що оцінки періоду можна знаходити як точки екстремальних значень компонентних статистик. Проаналізовано компонентні оцінки періоду, що знаходяться за допомогою дискретних перетворень Фур'є. Показано, що перехід від неперервного до дискретного оцінювання не змінює принципів властивостей оцінок, тобто при довільних кроках дискретизації вони залишаються асимптотично незміщеними й слухними. Однак величина кроку дискретизації впливає на швидкість збіжності оцінок, яка значно зменшується при наявності накладання як першого, так і другого роду. Виведено умови відсутності ефектів накладання. Отримано формули, що визначають статистичні характеристики оцінок у залежності від числа відліків, кроку дискретизації та параметрів модульованих сигналів, які дають можливість оцінити статистичні похибки обробки, які забезпечують наперед задану похибку.

У **сьомому розділі** на основі розглянутих в третьому-шостому розділах статистичних досліджень обґрунтовано алгоритми і створено програмне забезпечення для обробки реалізацій ПКВП-сигналів. Наведено загальну схему алгоритму взаємкореляційного та взаємоспектрального аналізів, визначення інтегральної та покомпонентної функцій когерентності, і на цій основі проведений взаємний аналіз горизонтальних і вертикальних вібрацій бездефектного підшипника кочення та з дефектами на зовнішньому та внутрішньому кільцях, отриманих на основі числових розв'язків системи двох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку з періодичними змінними коефіцієнтами.

У **восьмому розділі** наведено розроблену та виготовлену багатоканальну вібродіагностичну систему ПУЛЬС, яка служить для відбору та обробки вібраційних сигналів обертових механізмів і попередження на цій основі аварійних ситуацій. Для її апробації був виготовлений та введений в експлуатацію вібромеханічний стенд ВМС-1. Наведені приклади досліджень для вертикальних і горизонтальних вібрацій, відібраних з підшипникових вузлів центрифуги, з підшипникових вузлів електродвигуна вугільного конвеєра, з підшипникових вузлів турбогенераторів ТЕЦ, а також для бездефектного підшипника кочення.

У висновках сформульовано основні наукові результати. На всі використані літературні джерела, що складаються з 251 позиції, є посилання у тексті.

Дисертація має завершену логічну структуру, яка відповідає меті та поставленим і розв'язаним у роботі задачам. Мова та стиль викладення матеріалу є доступними для сприйняття. Наукові терміни у роботі вжиті коректно. Робота виконана на високому теоретичному рівні, а її обсяг відповідає змістовному наповненню.

Автореферат відображає суть основних наукових положень, практичну значущість та висновки.

Тематика дисертації та отримані результати відповідають паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Наукові положення та результати, які виносились на захист кандидатської дисертації “Статистичний аналіз і моделювання стохастичних циклічних навантажень при дослідженні втомних елементів конструкцій” (2007 рік) за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, не використовуються у поданій докторській дисертації.

Зауваження до роботи

1. У вступі занадто багато уваги звернуто на загальні задачі багатовимірної діагностики, однак недостатньо висвітлені питання розвинутого у ФМІ НАН України підходу, який ґрунтується на ПКВП-моделях вібрацій та в чому полягають причини доцільності ранньої діагностики.

2. Для визначення похибки статистичної обробки вібраційних сигналів в роботі отримані формули для зміщення оцінок відповідних характеристик, яке визначає систематичну похибку, та дисперсії, яка визначає середньоквадратичне відхилення. У роботі, на мою думку, слід було детальніше зупинитися на залежностях цих величин як від параметрів обробки, так і від параметрів, що описують імовірнісну структуру сигналів.

3. У роботі більше уваги слід було би приділити аналізу результатів верифікації створеного програмного забезпечення при взаємкореляційній та взаємспектральній обробці реалізацій найпростіших ПКВП-моделей, симульованих на комп'ютері.

4. При аналізі властивостей введених функцій когерентності доцільно було би більше уваги звернути на аналіз тих різних сторін взаємної нестационарності, які виражають кожна з цих функцій.

5. У роботі слід було би чіткіше окреслити ті нові можливості, які відкриваються при використанні взаємного ПКВП-аналізу.

Зазначені зауваження мають, в основному, рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не зменшують її актуальності, наукової та практичної цінності.

Загальний висновок щодо роботи

Вважаю, що дисертаційна робота Р. М. Юзефовича “Моделювання та статистичний аналіз взаємопов’язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів для виявлення дефектів механізмів”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані та практично важливі результати у вирішенні науково-прикладної проблеми – розроблення методів взаємного спектрально-кореляційного аналізу вібраційних сигналів на основі їх математичних моделей у вигляді періодично корельованих випадкових процесів при відомому і невідомому періоді нестационарності, обґрунтування функції когерентності для кількісного опису взаємозв’язків між періодично нестационарними властивостями сигналів, що дало можливість виявляти дефекти механізмів на ранніх стадіях їх розвитку, проводити їх локалізацію та встановлювати типи.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пп. 9, 10, 12, 13 “Порядку присудження наукових ступенів” щодо докторських дисертацій, а її автор, Юзефович Роман Михайлович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.


Офіційний опонент,
завідувач кафедри електронних засобів
інформаційно-комп’ютерних технологій
Національного університету
“Львівська політехніка”, д.т.н., професор



Ю. М. Романишин

Підпис завідувача кафедри електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій, д.т.н., проф. Романишина Ю.М. засвідчую.

Вчений секретар
Національного університету
“Львівська політехніка”, к.т.н., доц.

Р. Б. Брилинський