

67-72-31/1
13.03.17

ВІДГУК

офіційного опонента

Бомби Андрія Ярославовича

на дисертаційну роботу Юзефовича Романа Михайловича

“Моделювання та статистичний аналіз взаємопов’язаних періодично нестаціонарних вібраційних сигналів для виявлення дефектів механізмів”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертації

Важливою умовою підтримки на високому рівні ефективності і надійності механічних систем є своєчасне виявлення дефектів і попередження відмов, що виникають у процесі їх експлуатації. Виявлення і подальше усунення несправностей, своєчасна профілактика дозволяють знизити інтенсивність процесів зношування, підвищити ймовірність безвідмовної роботи складних машинних комплексів, а також виключити передчасний і пізній (аварійний) ремонт. Однією з умов визначення ступеня розвитку дефектів і їх ознак можливі лише на основі детального дослідження структури вібросигналів та її зв’язку з кінематикою і динамікою механізмів. Саме дослідження такої структури можливе на основі подання її у вигляді адекватних математичних моделей вібросигналів, які будуть описувати залежності, що відображають стан механічної системи. Слід зазначити, що характерними ознаками вібраційних коливань є повторюваність і стохастичність. Повторюваність зумовлена циклічним принципом дії багатьох механізмів, а стохастичність може бути викликана флуктуаціями як в середині механізму, зміною навантаження чи іншими чинниками. Оскільки поява дефектів приводить до нелінійності механічних коливних систем, то повторюваність і стохастичність виступають у властивостях вібрацій не незалежно, а у взаємодії. Саме в характері такої взаємодії проявляються ті властивості коливного процесу, які в багатьох випадках є визначальними для встановлення стану об’єкта, що його породжує. Застосування розробленої в дисертаційній роботі спектрально-кореляційної теорії, запропонованих методів взаємопов’язаних періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП), введені функції когерентності дозволяють провести якісний і кількісний аналіз імовірнісних характеристик детермінованої та стохастичної складових вібраційних сигналів, записаних синхронно в різних точках механічної системи. Такий підхід зумовлений розширенням і ускладненням кола науково-технічних проблем, які виникають у сучасних методах вібродіагностики та обробці сигналів, телекомунікаціях та зв’язку.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

В цілому наукові результати і висновки, сформульовані в дисертаційній роботі є обґрунтованими теоретично та підтверджені широким обсягом як симуляційних так і практичних результатів, практичним використанням. Автором для теоретичного обґрунтування наукових положень дисертаційної роботи коректно застосовано теорію випадкових процесів, математичну та прикладну статистику, методи Фур'є аналізу, методи статистичної теорії багатомірних періодично нестационарних випадкових процесів, методи обчислювальної математики, методи розв'язування нелінійних рівнянь, метод малого параметру, комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження.

Достовірність основних положень і наукових результатів дисертації забезпечується коректною постановкою та розв'язуванням задач статистичної теорії випадкових процесів, доведенням середньоквадратичної збіжності оцінок характеристик, які використовують при обробці експериментальних даних, верифікацією отриманих результатів на основі симуляційних комп'ютерних моделей, порівнянням результатів з відомими з літератури, результатами практичного застосування для діагностики механічних систем на підприємствах України.

Наукова новизна отриманих результатів та практичне значення роботи

У дисертаційній роботі одержано такі нові наукові результати:

1. Розроблено спектрально-кореляційну теорію взаємопов'язаних ПКВП-сигналів, встановлено особливості представлень їх імовірнісних характеристик рядами Фур'є та проаналізовано їх зв'язок з характеристиками випадкових процесів, що описують амплітудну й стохастичну модуляції несучих гармонік вібросигналів.

2. Запропоновано і обґрунтовано інтегральну та покомпонентну функції когерентності для кількісного опису взаємозв'язку між властивостями нестационарності ПКВП-сигналів та 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, виведено умови асимптотичної незміщеності та слушності неперервних і дискретних оцінок взаємокореляційної функції та взаємокореляційних компонентів, встановлено умови відсутності ефектів накладання першого й другого роду.

4. Отримано компонентні оцінки взаємокореляційної функції, які знаходяться на основі тригонометричного полінома, коефіцієнти якого обчислюють за допомогою як неперервних, так і дискретних перетворень Фур'є скінчених відрізків реалізацій сигналів, встановлено умови їх середньоквадратичної збіжності.

5. Розроблено теоретичні основи емпіричного непараметричного взаємоспектрального аналізу ПКВП-сигналів. Для оцінювання взаємоспектральної густини і взаємоспектральних компонентів обґрунтовано корелограмний метод, який є узагальненням метода Блекмана-Тьюкі, та доведено слушність оцінок.

6. Когерентний і компонентний методи взаємкореляційного аналізу узагальнено на випадок, коли період нестационарності є невідомим, доведено, що точки екстремальних значень статистик відносно пробного періоду є асимптотично незміщеними і слушними оцінками періоду, а самі величини цих екстремумів збігаються в середньоквадратичному до взаємкореляційних функцій чи взаємкореляційних компонентів.

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

Практичне значення наукових результатів дисертаційної роботи визначається насамперед у створенні програмного забезпечення для аналізу стохастичних коливань різного походження на основі експериментальних даних. Це програмне забезпечення дає можливість обчислювати весь комплекс спектрально-кореляційних характеристик коливань, які досить повно описують їх структуру. Знання такої структури коливань є необхідним для встановлення стану систем, які їх породжують, в тому числі механічних. Використання характеристик періодичної нестационарності для аналізу вібрацій дає можливість виявляти дефекти таких систем на ранній стадії розвитку. Взаємний статистичний аналіз вібрацій є ефективним засобом для встановлення їх просторових властивостей, локалізації їх джерел, встановлення типів. Статистична обробка вібраційних сигналів цілого ряду дефектних механізмів показала високу ефективність використання для цього частотних залежностей введених функцій когерентності.

Дисертаційну роботу виконано у лабораторії вібродіагностики Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт НАН України, у 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) впродовж 2008–2016 рр. Також дисертантом одержано практичні результати при виконанні науково-дослідних робіт з госпдоговірної тематики.

Результати наукових досліджень використано на підприємствах України, що підтверджено відповідними актами, які наведені в додатку дисертаційної роботи.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах

Основні наукові результати дисертації відображені у 79-и публікаціях, з них 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.

В опублікованих працях у повному обсязі викладено основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

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 *першому розділі* традиційно розглянуто основні задачі багатовимірної вібраційної діагностики. Описано фізичні величини, які характеризують вібрації (переміщення, швидкість, прискорення), показано, що оцінка параметрів вібрацій за однією з величин може призвести до помилкових висновків про динамічний стан об'єкта і не дозволить передбачити втомні, резонансні та інші критичні ситуації.

Далі (у *другому розділі*) представлено основи спектрально-кореляційної теорії зв'язаних періодично корельованих випадкових процесів – математичних моделей вібраційних сигналів. Показано, що взаємоспектральні компоненти визначають одночасно ступінь корельованості гармонік у представленнях кожного з сигналів. Для кількісної характеристики такого взаємозв'язку введені інтегральна і покомпонентна функції когерентності, і доведено, що вони не змінюються при лінійних перетвореннях сигналів. Властивість інваріантності дає можливість використовувати введені величини при виявленні нелінійних спотворень сигналів, які мають місце при виникненні дефектів.

У *третьому розділі* подано основи когерентного взаємокореляційного аналізу ПКВП-сигналів. 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 взаємокореляційних компонентів, які знаходяться на основі інтегральних сум, що є наближеними значеннями відповідних інтегралів. Показано, що дискретизація приводить до збільшення як систематичної, так і випадкової похибок оцінювання, що в значній мірі зумовлено ефектами накладання першого й другого роду. Отримано умови

відсутності ефектів накладання першого й другого роду.

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 математичного сподівання. Доведено, що компонентні оцінки є ефективнішими від когерентних, особливо при малому числі гармонік та швидкому зниканні кореляційних зв'язків. У розділі отримано та проаналізовано формули для визначення статистичних характеристик дискретних компонентних оцінок взаємкореляційної функції. Досліджено ефекти накладання першого і другого роду та отримано умови їх відсутності.

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. У розділі проведено аналіз властивостей оцінок взаємспектральних компонентів, які отримуються на основі згладжених оцінок взаємспектральних компонентів. Отримано асимптотичні формули для коефіцієнтів Фур'є дисперсії оцінки взаємспектральних компонентів, які виражають залежності цих величин від спектральних компонентів, довжини реалізації, форми вибраного вікна та точки усікання корелограми. Проведено аналіз як неперервних, так і дискретних оцінок взаємспектральної густини. Отримано прості асимптотичні вирази для зміщення й дисперсії оцінки. На основі цих виразів виконано 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. У розділі показано, що формування таких оцінок може бути проведено як за когерентним, так і за компонентним методом з тією особливістю, що замість істинного значення періоду в них використовується деякий пробний період. У розділі 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.

На основі розглянутих в третьому-шостому розділах статистичних досліджень обґрунтовано алгоритми і створено програмне забезпечення для обробки реалізацій ПКВП-сигналів, які описано у *сьомому розділі*. Також у розділі наведено загальну схему алгоритму взаємкореляційного та взаємспектрального аналізів, визначення

інтегральної та покомпонентної функцій когерентності. Наведена схема статистичної обробки була використана для взаємного аналізу горизонтальних і вертикальних вібрацій бездефектного підшипника кочення, та з дефектами на зовнішньому та внутрішньому кільцях, отриманих на основі чисельних розв'язків системи двох нелінійних диференційних рівнянь другого порядку з періодичними змінними коефіцієнтами.

У восьмому розділі, для використання розроблених методів при обстеженні промислових об'єктів наведено розроблену та виготовлену мобільну багатоканальну вібродіагностичну систему ПУЛЬС, яка служить для відбору та обробки вібраційних сигналів обертових механізмів і попередження на цій основі аварійних ситуацій. Описано характеристики створеної системи. Для її апробації був виготовлений та введений в експлуатацію вібромеханічний стенд ВМС-1. На основі результатів статистичної обробки різноманітних сигналів встановлено характерні риси взаємкореляційної та взаємспектральної структур вібрацій механізмів, на яких виявлено ті чи інші дефекти. Приклади досліджень наведені 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.

Список використаних джерел складається з 251 позиції.

Структура дисертації логічна, відповідає меті та поставленим у роботі задачам. Мова та стиль викладення матеріалу є доступними для сприйняття. Наукові терміни у роботі вжиті коректно. Пояснення у тексті супроводжуються необхідною кількістю рисунків, таблиць та математичними викладками. На всі пронумеровані формули, рисунки, таблиці, а також літературні джерела, є посилання у тексті. Робота виконана на високому теоретичному рівні, а її обсяг відповідає змістовному наповненню.

Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

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

Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень, на основі яких захищена кандидатська дисертація

Результати наукових досліджень, за якими здобувач у 2007 р. захистив кандидатську дисертацію на тему "Статистичний аналіз і моделювання стохастичних циклічних навантажень при дослідженні втомних елементів конструкцій" за спеціальністю

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, у спеціалізованій вченій раді Д 35.052.05 при Національному університеті “Львівська політехніка”, не використовуються як наукові результати докторської дисертації здобувача і не виносяться на її захист.

Зауваження до роботи

1. У дисертаційній роботі наведені результати взаємного аналізу горизонтальних і вертикальних складових вібрацій для симульованого (у сьомому розділі – 7.4) і реального (у восьмому розділі – 8.5) бездефектного підшипників кочення. Висновки про дані результати не наведені в авторефераті.

2. Представлення для статистичних характеристик у дисертаційній роботі подані в комплексній формі і не показані їх переходи до дійсних величин.

3. У роботі розроблені когерентний та компонентний методи визначення періоду взаємної нестационарності, отримані формули, які визначають похибки його визначення, однак недостатньо уваги приділено порівнянню обох методів.

4. При взаємній статистичній обробці вібрацій конкретних механізмів автор дисертації недостатньо уваги приділив аналізу різниці властивостей взаємкореляційних і взаємспектральних характеристик при розподіленому та локальному дефектах.

5. У роботі можна було б більше уваги приділити питанню вибору основних параметрів обробки – довжини реалізації, кроку дискретизації, точки усікання корелограми.

6. У роботі знайдено граматичні описки (наприклад, стор. 57, 121, 229, 296).

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

Загальний висновок по роботі

У цілому дисертаційна робота Р. М. Юзефовича виконана на високому науковому рівні, у роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему – розроблено методи 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 важливі для практики науково-обґрунтовані результати.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. За своїм змістом, науковим рівнем, обґрунтованістю висновків та рекомендацій, практичним значенням дисертація відповідає вимогам, які ставляться до написання та оформлення докторських дисертацій, а її автор Роман Михайлович Юзефович за проведені дослідження заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри інформатики
і прикладної математики
Рівненського державного
гуманітарного університету,
доктор технічних наук, професор



А. Я. Бомба