

ВІДГУК

офіційного опонента, завідувача відділу числових методів математичної фізики
Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача
Національної академії наук України, доктора технічних наук, професора
Андрійчука Михайла Івановича

на дисертаційну роботу Личака Олега Васильовича

“Математичне моделювання нестационарних випадкових сигналів для виявлення
дефектів механізмів на початкових стадіях”, подану на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та
обчислювальні методи

1. Актуальність теми дослідження та зв'язок з науковими програмами, планами та темами. Діагностика механізмів та підтримка їх надійної експлуатації є важливою складовою підтримки функціонування промисловості в Україні в умовах війни і трансформації шляхів постачання комплектуючих. Оптимальна експлуатація механізмів полягає у підтримці їх життєвого циклу з заданим рівнем надійності функціонування. Це забезпечується відповідним рівнем діагностування механізмів у процесі їх роботи та о забезпеченням точності визначення імовірності їх безвідмовної роботи. Оптимальна експлуатація механізмів передбачає забезпечення оптимальної організації підтримання працездатності усіх елементів на основі рекомендацій їх виробників. Разом з тим, забезпечення працездатності механізму як експлуатованої технічної системи потребує обслуговування її окремих елементів, виходячи з фактичного технічного стану та умов експлуатації. Виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку є важливим як з точки зору забезпечення експлуатаційникам відтинку часу, необхідного для замовлення та постачання необхідних елементів механізму так і з точки зору отримання коректної оцінки надійності працездатності механізму. Недооцінка (чи не виявлення) дефектів на ранній стадії їх розвитку призводить до зміщення (завищення) отриманої оцінки надійності роботи механізму, що підвищує ризик аварійних ситуацій. З іншого боку, виявлення та оцінка стану розвитку дефекту в часі дозволяє оптимально прогнозувати зміст і об'єм планових та попереджувальних ремонтів механізмів, що у свою чергу дозволяє суттєво знижувати експлуатаційні витрати.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему розробки методів статистичного аналізу сигналів вібрацій пошкоджених механізмів на основі математичних моделей багатокомпонентних нестационарних випадкових процесів зі стохастичною амплітудно-фазовою модуляцією несучих гармонік і з використанням перетворення Гільберта. Слід зауважити, що дослідження їх кореляційно-спектральної

структури дає можливість виявляти і встановлювати типи дефектів у механізмах, їх локалізацію та оцінювати ступінь їхнього розвитку.

Проблематика дисертаційної роботи пов'язана з планами наукових досліджень, які проводились у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України при виконанні ряду держбюджетних тем НАН України: “Розроблення нових інформаційних технологій спекл-кореляції і фазозсувної спекл-інтерферометрії для дослідження напружено-деформованого стану поверхонь зразків конструкційних матеріалів та динаміки їх руйнування” (2004-2006, державний реєстраційний номер 0104U004176); “Дослідження структури просторових полів переміщень і деформацій поверхонь конструкційних матеріалів методами спекл-метрології та інтерферометрії” (2007-2009, 0107U004068); “Розроблення методів визначення параметрів локального руйнування конструкційних матеріалів під дією статичних і циклічних навантажень на основі фазозсувної інтерферометрії і спекл-кореляції” (2010-2012, 0110U000432); “Встановлення методами спекл-метрології та інтерферометрії деформаційних характеристик матеріалів для оцінювання параметрів їх руйнування з урахуванням локальних зон пружно-пластичного стану” (2013-2015, 0113U000306); “Розроблення технологій діагностування елементів конструкцій та локального руйнування засобами оптичної спекл-метрології, фазозсувної інтерферометрії та цифрової голографії” (2016-2018, 0116U004952); “Розроблення інформаційних технологій та засобів вібраційної діагностики на основі періодично нестационарних нелінійних моделей з використанням перетворення Гільберта” (2019-2021, 0119U101061); “Інформаційно-вимірювальна система вібраційного контролю для неперервного моніторингу обертових вузлів” (2021, 0121U110376); “Розроблення методів кореляційного аналізу поліритмічної структури вібраційних сигналів для підвищення ефективності діагностики елементів вузлів механізмів з різними швидкостями обертання” (2022-2024, 0122U002138).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи автора є обґрунтовані та підтверджені коректним використанням відповідних методів теорії випадкових процесів, математичної статистики, неперервного та дискретного Фур'є-аналізу, обчислювальної математики; статистичної теорії періодично нестационарних випадкових процесів, методів розв'язування нелінійних рівнянь, методу малого параметру, математичного і комп'ютерного моделювання сигналів та дослідженням практичних діагностичних сигналів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням методів теорії сигналів, сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, широким обговоренням висунутих наукових положень та отриманих висновків на багатьох міжнародних та національних науково-

технічних конференціях, проведенням числового моделювання та практичних експериментальних робіт. Отримані результати відповідають висунутим теоретичним положенням.

3. Наукова новизна результатів дослідження. Наукова новизна дисертаційної роботи яка полягає у наступному:

– сформульовано означення дефекту у механізмі на ранній стадії розвитку як періодично нестационарного випадкового процесу, котрий призводить до появи періодично нестационарного випадкового сигналу (ПНВС) з прихованою періодичністю;

– встановлено, що до періодичної нестационарності призводять взаємні кореляції між модулюючими процесами, що дозволило встановити діагностичні індикатори на основі параметрів сигналів для виявлення та оцінки ступеня розвитку дефектів;

– розроблено теоретичні основи використання перетворення Гільберта для аналізу діагностичних ПНВС і доведено, що перетворення Гільберта безпосереднього не може використовуватися для демодуляції такого сигналу;

– встановлено, що аналітичний сигнал від ПНВС з високочастотною широкосмуговою та амплітудно-фазовою модуляцією несучих є також ПНВС, при цьому квадрат модуля аналітичного сигналу, який називають “квадратом обвідної” є випадковим процесом, моментні функції якого змінюються періодично з часом, тому для його аналізу неможливо використовувати перетворення Фур’є, методи “обвідної” чи “спектру квадрату обвідної”.

– встановлено, що амплітудно-фазово модульовані стохастичним сигналом багатокомпонентні ПНВС можна представити суперпозицією високочастотних компонент, які є стаціонарними і взаємно періодично нестационарно зв’язаними випадковими процесами, що зводить дослідження властивостей сигналу до аналізу кореляційних компонентів квадратур модуляцій високочастотних несучих;

– встановлено, що параметри смуги фільтрації сигналу ПНВС повинні вибиратися виходячи з величин взаємних кореляцій високочастотних компонент вищих порядків, що підвищує ефективність діагностування;

– показано, що використання смугової фільтрації, перетворення Гільберта і аналітичного сигналу для виділення та аналізу кореляцій квадратур високочастотних гармонік дає змогу побудувати карту взаємних кореляцій, котра має характерні особливості для різних дефектів;

– розроблено вимоги до відбору діагностичних сигналів та покроковий алгоритм їх обробки, які дають можливість виявити і описати в рамках моментних функцій першого і другого порядків їх структуру, у тому числі структуру високочастотної, широкосмугової та амплітудно-фазової модуляцій;

– розроблений підхід застосовано до аналізу сигналів від механізмів з дефектами, описані основні закономірності та відмінності між сигналами різних дефектів, проведено демодуляцію високочастотних компонент, та описана їх кореляційна структура на основі побудованих карт кореляцій;

– встановлено, що високочастотна модуляція несучих гармонік ПНВС вібраційних сигналів підшипника є вузькосмуговою і може бути описана суперпозицією представлень сигналу за формулами Райса;

4. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, що складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 258 найменуваннями та 10 додатків на 24 сторінках. Зміст роботи викладено на 344 сторінках, з яких 292 містять основний текст, та 79 рисунків і 11 таблиць.

У **Вступі** обґрунтована актуальність наукової проблеми, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені об'єкт та предмет досліджень, відображені основні наукові результати, висновки, їх практичне значення та інші кваліфікаційні параметри, згідно з чинним законодавством.

Перший розділ присвячений аналізу структури підтримки життєвого циклу механізмів, моделям діагностичних сигналів та методам їх обробки. Показано, що виявлення дефектів у системах на ранніх стадіях розвитку дозволяє підвищити точність оцінювання надійності механізмів та оптимізувати витрати на підтримання їх працездатності. Показано, що ранню стадію розвитку дефекту не можна вважати станом чи подією згідно з існуючими стандартними означеннями. Розглянуто різні типи математичних моделей діагностичних сигналів та методи їх аналізу. Зазначено, що найбільш близькими моделями обробки діагностичних сигналів механізмів є моделі циклостаціонарних процесів та періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП).

У **другому розділі** розглянуто синергетику нелінійних динамічних систем зі збуренням. На основі синергетичного підходу розглянуто поведінку таких систем при переході до якісно нового стану в околі “точки біфуркації” системи. Показано, що такий перехід супроводжується складними коливаннями, що є результатом взаємодії коливних, та випадкових процесів, котрі мають ознаки нестационарності. Тобто, зародження дефектів (у термінах синергетики - прихованих атракторів, тобто нових стійких станів) у нелінійній динамічній системі має хаотичну природу, що супроводжується виникненням прихованих періодичних коливань. Частоти цих коливань можуть бути не рівними власним частотам системи і не є результатом явища стохастичного резонансу. Це може бути набір частот, кратних до певної частоти і мати складні модуляції. Обґрунтовано, що процес розвитку дефекту на ранній стадії є періодично нестационарним випадковим процесом (ПНВП).

Третій розділ присвячений дослідженню оцінок статистичних параметрів періодично нестационарного випадкового сигналу (ПНВС), який є наслідком процесу розвитку дефекту в діагностованій системі та пошуку періоду основної (базової) частоти. Проведено порівняльний аналіз когерентного та компонентного методів аналізу сигналу за умови невідомого періоду нестационарності. Розглянуто модель прихованих періодичностей для ПНВС. Показано, що оцінка зміщення визначення періоду базової частоти має порядок малості $O(N^{-2})$, а оцінка дисперсії визначення періоду базової частоти має порядок малості $O(N^{-3})$. Отримано формули для зміщення та дисперсії оцінок функції математичного сподівання та її коефіцієнтів Фур'є. Досліджено слушність оцінок кореляційної функції та кореляційних компонентів за відомої величини періоду нестационарності. Встановлено, що до періодичної нестационарності другого порядку (прихованої періодичності) призводять взаємні кореляції між модулюючими процесами.

Четвертий розділ присвячено методам виявлення періодичної нестационарності ПНВС у частотній області. Доведено, що частотний діапазон часових змін миттєвої спектральної густини ПНВС визначається косинусними перетвореннями від косинусних і синусних кореляційних компонентів. Отримано формули для величин зміщення та дисперсії оцінок базової частоти ПНВС використанням компонентних статистик. Встановлено, що зміщення оцінки, яка знаходиться на базі косинусної складової залежить від нульового і косинусних кореляційних компонентів, на базі синусної складової – від синусних кореляційних компонентів. Сформульовано умови відсутності накладання і просочування частот у процесі обробки ПНВС. Отримані залежності оцінок зміщення періоду нестационарності мають порядок малості $O(N^{-2})$. Отримано формули для зміщення та дисперсії дискретних оцінок базової частоти за умови відсутності ефектів накладання просочування при обробці сигналів.

П'ятий розділ присвячено розробці моделі ПНВС на основі перетворення Гільберта та аналітичного сигналу. Доведено ряд теорем щодо автокореляційних та взаємокореляційних функцій мультиплікативної моделі ПНВС і його перетворення Гільберта. Показано, що аналітичний сигнал, побудований з сигналу та його перетворення Гільберта є комплекснозначним ПКВП. Дисперсія такого аналітичного сигналу дорівнює сумі дисперсій сигналу та його перетворення Гільберта. Математичне сподівання суми квадратів сигналу і перетворення Гільберта (так званий "квадрат огинаючої") дорівнює подвоєній дисперсії сигналу. Амплітуди гармонік "квадрату огинаючої" визначаються амплітудами квадрату функції, що описує низькочастотну регулярну несучу. Доведено, що функції взаємної кореляції утворюють періодичні компоненти кореляційної функції сигналу. Показано, що демодуляцію квадратур

модулюючих процесів можна отримати за допомогою перетворення Гільберта компонент вищих порядків.

Розглянуто випадки високочастотної вузькосмугової та широкосмугової амплітудно-фазової модуляції несучої у ПНВС. Проаналізовано випадок сигналу з амплітудно-фазовою вузькосмуговою високочастотною модуляцією несучої, на основі квадратурної моделі Райса.

Проаналізовано випадок широкосмугової високочастотної амплітудно-фазової модуляції багатокомпонентного сигналу. Отримано представлення для взаємкореляційних функцій сигналу та його перетворення Гільберта. Показано, що за рахунок фільтрації сигналу не лише зменшується потужність стаціонарного фону, але також зменшуються величини амплітуд гармонік дисперсії, за умови, якщо корельовані компоненти спектру сигналу не потрапляють в смугу пропускання фільтра. Встановлення параметрів смуги фільтрації сигналу повинно виходити з умови перекривання корельованих компонент сигналу. Розглянуто вузькосмугову модуляцію багатокомпонентного сигналу, представляючи кожен модулюючий процес формулами Райса. Наведено результати симулювання та обробки симульованого сигналу ПНВС.

У **шостому розділі** наведено результати обробки реальних сигналів. Представлено структурну схему обробки сигналів, що передбачає використання запропонованої моделі ПНВС і алгоритму обробки багатокомпонентних сигналів.

Представлено результати обробки та аналізу сигналу вібраційного прискорення, відібраного від підшипникового вузла механізму декантера. Детально досліджено структуру взаємних кореляцій високочастотних модулюючих складових спочатку у трьох виділених вузьких смугах для порівняння з результатами симуляції сигналу. Також проведено покроковий аналіз сигналу у складі 19 спектральних компонент, побудовано матриці кореляцій розмірами (19x19) та її нормалізованих коефіцієнтів кореляцій. Матриця кореляцій представлена картою кореляцій. Запропоновано індикатор нестационарності сигналу для оцінки ступеня розвитку дефекту. Розраховано оцінки індикатора нестационарності сигналу для різних величин смуг пропускання (числа спектральних компонент взятих до уваги при обробці). Показано, що кореляційні зв'язки між спектральними компонентами з різними частотами спадають залежно від різниці між номерами їх порядків що узгоджується з представленою теоретичною моделлю ПНВС. Показано, що вибір смуги обробки ПНВС можна проводити на основі величини нормованого коефіцієнта кореляції між спектральними компонентами, що знаходяться на протилежних краях смуги пропускання.

Для порівняння результатів виконано обробку цього ж сигналу з використанням “спектрального ексцесу” для пошуку “інформативної смуги” частот у методі “квадрату огинаючої”. Показано, що отримані методом “квадрату огинаючої” оцінки суттєво залежать від розміру вибірки сигналу, отже є неслухними.

Наведено результати обробки та аналізу вібросигналів підшипників з дефектами, отриманих з бази Case Western Reserve University. Представлено результати обробки сигналів підшипника кочення з дефектами розміром 0,18 мм та 0,36 мм на зовнішньому кільці. Розраховано величини оцінок індикаторів першого та другого порядку для різної величини дефекту. Показано, що індикатор другого порядку має високу чутливість до приросту розміру дефекту. Наведено результати обробки сигналів вібрацій підшипників, котрі описані на сайті як такі, для яких не вдалося виявити сигнатури дефектів сучасними методами обробки. Отримано для них оцінки величин індикатора першого порядку, що дозволяють виявити у цих сигналах ознаки дефектів.

Наведено результати обробки оптичного спекл-сигналу зображень шорсткої поверхні зразка при статичному навантаженні відповідно до стандарту визначення тріщиностійкості матеріалу. Показано ефективність запропонованої моделі та методики обробки діагностичного ПНВС сигналу для обробки таких сигналів. Наведено карти кореляцій (у просторі сигналу) та отримані оцінки величини індикатора нестационарності першого порядку за різної величини навантаження зразка. Продемонстровано відношення сигнал/шум більше 10 при визначенні взаємно кореляційних складових вищих порядків та високу чутливість індикаторів ступеня розвитку дефекту.

У **Висновках** сформульовано основні наукові результати.

Висновки сформульовані у роботі повною мірою представляють отримані у дисертаційному дослідженні результати, мають належний науковий рівень та відповідають вимогам до результатів докторської дисертації. Дисертаційна робота має завершену обґрунтовану структуру та форму представлення, що повною мірою розкриває досягнуту мету та виконані завдання дослідження.

У **Додатках** наведено список публікацій здобувача, схеми зміни індексів сумування, інтегрування при оцінюванні потужності сигналів у смугах, виведення формул для визначення взаємкореляційних функцій складових сигналів і їх квадратур та акти впровадження результатів роботи.

Результати кандидатської дисертації в докторській дисертації не використовувались.

5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи. Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у створенні моделей діагностичних сигналів як ПНВС та методів їх аналізу, алгоритмічного забезпечення для обробки сигналів. Показано, що запропоновані моделі і методи дають змогу виявляти та оцінювати сигнали від дефектів у механічних системах на ранніх стадіях розвитку, встановлювати оптимальні параметри обробки цього сигналу, отримувати оцінку розвитку дефекту, ідентифікувати його тип та походження. Результати практичних досліджень

використано у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України при виконанні ряду держбюджетних тем, крім цього практична цінність запропонованих моделей сигналів та методів їх обробки підтверджується результатами їх впровадження в практику діагностичних робіт на підприємствах в Україні.

6. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 77 наукових праць, серед яких 29 у наукових фахових виданнях України та закордонних виданнях. З них включено у наукометричну базу Scopus 10 статей (6 віднесено до квартилю Q1-Q2, 4 – до квартилю Q3). Також є 44 публікації у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій (з них 11 публікацій включено в наукометричну базу Scopus), 4 патенти України. Загалом 21 публікація, що відображає основні результати роботи, включено до наукометричної бази Scopus.

Результати аналізу публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи вказують на повноту викладу основних наукових положень та дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності у процесі підготовки докторської дисертації. Загальна кількість публікації та їх зміст достатньою мірою висвітлюють результати дисертаційної роботи.

7. Зауваження.

1. У роботі недостатньо уваги приділено огляду відомих методів обробки багатокомпонентних діагностичних сигналів та порівнянню їх результатів з запропонованими моделями сигналів і методами їх обробки.

2. Огляд відомих методологій визначення періоду прихованої періодичності неведено не у вступному розділі, а у розділі 3, присвяченому оцінці періоду ПНВС.

3. Автор вказує на послідовність визначення періоду прихованої періодичності – спочатку когерентний метод а потім компонентний для уточнення результатів, однак при обробці даних наводить лише результати, отримані з використанням функціоналу на основі компонентного методу.

4. Хоча у роботі максимально детально виконано аналіз симульованого сигналу та вібраційного сигналу декантера, але результати обробки вібраційних сигналів підшипників і спекл-сигналу представлені без покрокової деталізації.

5. Автор посилається на використання експериментальних даних сигналів вібраційного прискорення від підшипників з дефектами отриманих з бази даних Case Western Reserve University без детального опису схеми проведення експерименту.

6. У першому розділі автор використовує англійську термінологію в поданих рисунках, не наводячи відповідників у тексті українською. У наступних розділах, де

вказуються параметри по осях на рисунках, не всюди пояснюється зміст цих величин. Деякі рисунки виконано з недостатньою роздільною здатністю.

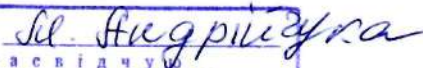
8. Загальні висновки. Вказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота О. В. Личака “Математичне моделювання нестационарних випадкових сигналів для виявлення дефектів механізмів на початкових стадіях розвитку”, 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 вирішено нову науково-прикладну проблему – розробка методів статистичного аналізу сигналів вібрацій пошкоджених механізмів на основі математичних моделей багатокомпонентних нестационарних випадкових процесів зі стохастичною амплітудно-фазовою модуляцією несучих гармонік, з використанням перетворення Гільберта досліджено їх кореляційно-спектральну структуру, на основі якої можна встановлювати типи дефектів у механізмах на ранніх стадіях розвитку, їх локалізацію та оцінювати ступінь розвитку.

Зважаючи на актуальність дисертаційного дослідження, новизну теоретичних положень, практичну цінність результатів, рівень висвітлення результатів дослідження в публікаціях наукових видань можна зробити висновок, що дисертація відповідає вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, зокрема, пп. 6, 7, 8, 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук” затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 липня 2021 р., а її автор, Личак Олег Васильович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Офіційний опонент,
завідувач відділу числових методів математичної фізики
Інституту прикладних проблем механіки і математики ім.
Я. С. Підстригача Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор


Михайло АНДРІЙЧУК

Підпис 
засвідчує
Вчений секретар ІППМ
ім. Я.С.Підстригача НАНУ
