

ВІДГУК

офіційного опонента, провідного наукового співробітника,
відділу електромеханічних систем

Інституту електродинаміки Національної академії наук України,
доктора технічних наук, старшого наукового співробітника

Зварича Валерія Миколайовича,

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

Експлуатація промислових механічних систем та різного виду механізмів циклічної дії, як вітчизняного, так і закордонного виробництва, у сучасних умовах вимагає заданої надійності, що може бути забезпечений відповідним рівнем діагностики. Таким чином, правильна експлуатація механізмів зводиться до оптимальної організації підтримання працездатності елементів механізмів з дотриманням рекомендацій виробників та з урахуванням реальних умов їх роботи. Вирішення загальної проблеми забезпечення ефективності експлуатації різного виду промислових механічних систем потребує їх обслуговування за фактичним технічним станом.

Важливим є те, що для виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку, дає змогу розробити новий підхід для управління їх ресурсом шляхом корегування періодичності технічного обслуговування, що рекомендована виробниками, з урахуванням фактичних умов експлуатації.

Робота присвячена розробці 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, що дає можливість встановлювати типи дефектів у механізмах, їх локалізацію та оцінювати ступінь розвитку. Виходячи з цього, актуальність теми дисертаційної роботи О.В. Личака не викликає сумніву.

Дослідження безпосередньо пов'язані 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, держресстраційний 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 О.В. Личака повністю обґрунтовані, що підтверджуються коректним використанням методів теорії випадкових процесів, математичної статистики, методів неперервного та дискретного Фур'є аналізу, методів обчислювальної математики; методів статистичної теорії періодично нестационарних випадкових процесів, методів розв'язування нелінійних рівнянь, методу малого параметру, комп'ютерного моделювання, а також проведенням експериментальних досліджень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням фундаментальних законів класичної

теорії та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, численними експериментами. Отримані експериментальні результати знаходяться в задовільній якійсній та кількісній відповідності до висунутих теоретичних положень.

3. Наукова новизна результатів дослідження

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній вперше:

- сформульовано означення ранньої стадії розвитку дефекту як періодично нестационарного випадкового процесу в околі точки біфуркації нелінійної динамічної системи зі збуренням, котрий супроводжується появою в поведінці системи прихованих коливань, що дало можливість сформулювати вимоги до побудови моделі діагностичних сигналів;

- встановлено, що до періодичної нестационарності (прихованої періодичності) призводять взаємні кореляції між модулюючими процесами, що дозволило визначити діагностичні параметри сигналів для виявлення та оцінки ступеня розвитку дефектів;

- розроблено теоретичні основи використання перетворення Гільберта для аналізу діагностичних періодично нестационарних випадкових процесів (ПНВС), що характеризуються широкосмуговою високочастотною модуляцією несучих. Показано, що перетворення Гільберта безпосереднього не може використовуватися для демодуляції такого сигналу;

- показано, що аналітичний сигнал від ПНВС з високочастотною широкосмуговою та амплітудно-фазовою модуляцією несучих є також ПНВС, а квадрат модуля аналітичного сигналу, який називають “квадратом обвідної” є випадковим процесом, моментні функції якого змінюються періодично з часом, тому його аналіз необхідно проводити методами ПНВС та встановлено, що застосування відомих методів “обвідної”, “спектру квадрату обвідної” для аналізу багатокомпонентних ПНВС є некоректним;

- показано, що стохастично амплітудно-фазово модульовані коливання ПНВС представляються суперпозицією високочастотних компонент, які є стаціонарними і взаємно періодично нестационарно зв'язаними випадковими процесами, що зводить дослідження властивостей сигналу до аналізу кореляційних компонентів вищих порядків квадратур високочастотних несучих;

– показано, що фільтрація сигналу ПНВС повинна базуватися з врахуванням оцінок взаємних кореляцій високочастотних компонент вищих порядків, це дозволило сформулювати вимоги до коректного вибору смуги обробки ПНВС та підвищити ефективність діагностування;

– показано, що використання смугової фільтрації і перетворення Гільберта для виділення та аналізу кореляцій квадратур високочастотних гармонік дає змогу побудувати карту кореляцій, котра має характерні особливості для різних дефектів і служить основою для обґрунтованого вибору смуги частот при аналізі сигналу;

– обґрунтовано процедури відбору та обробки діагностичних сигналів, які дають можливість виявити і описати в рамках моментних функцій ПНВП першого і другого порядків їх структуру, в тому числі структуру високочастотної, широкосмугової та амплітудно-фазової модуляцій, що забезпечило вищу ефективність діагностики у порівнянні з відомими підходами;

– в рамках моментних функцій першого і другого порядків розроблений підхід застосований до аналізу розподіленого і локального дефектів механізмів, описані основні закономірності та відмінності між сигналами таких дефектів, проведено демодуляцію високочастотних компонент, та описана їх кореляційна структура на основі побудованих карт кореляцій;

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

показано, що кореляції квадратур модуляцій є повільно осцилюючими функціями часового зсуву, що зумовлює схожу форму кореляційних компонентів, а інтервал кореляційних компонентів є набагато більшим ніж період нестационарності.

4. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Вона складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 258 найменувань та 10 додатків на 24 сторінках. Зміст роботи викладено на 344 сторінках, з яких 292 містять основний текст, 79 рисунків та 11 таблиць.

У *вступі* обґрунтована актуальність наукової проблеми, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені об'єкт та предмет досліджень, відображені основні наукові результати, їх практичне значення та інші кваліфікаційні параметри, згідно чинного законодавства.

У першому розділі проаналізовано структури систем підтримки життєвого циклу механізмів та показано важливість виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку. Розглянуто різні типи моделей систем. Обґрунтовано, що не існує загальних моделей діагностичних сигналів чи строго визначеної методології їх аналізу. Показано, що найбільш близькими моделями для обробки діагностичних сигналів механізмів є моделі циклостационарних процесів та періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП).

Другий розділ присвячений аналізу математичних моделей нелінійних динамічних систем зі збуренням. У рамках синергетичного підходу до аналізу таких систем, перехід до якісно нового стану (точка біфуркації системи) супроводжується коливаннями, що є складною взаємодією коливних, квазіколивних та випадкових складових, і має ознаки нестационарності та стохастичності. Тобто, зародження нових дефектів в досліджуваній системі має хаотичну природу, що супроводжується виникненням прихованих періодичних коливань. Встановлено, що ранню стадію розвитку дефекту у динамічній нелінійній системі зі збуренням не можна вважати станом чи подією згідно з існуючими стандартними означеннями. Обґрунтовано, що процес розвитку дефекту на ранній стадії є ПНВП.

Третій розділ присвячений дослідженню оцінок статистичних параметрів та пошуку періоду ПНВС, який є наслідком процесу розвитку дефекту в діагностованій системі. Проведено порівняльний аналіз когерентного та компонентного методів кореляційного аналізу сигналу при невідомому періоді нестационарності. Розглянуто модель прихованих періодичностей для ПНВС. Показано, що періодичність у ПНВС може проявлятися або в імовірнісних характеристиках першого порядку, тобто в характеристиках регулярної складової коливань, або у характеристиках другого порядку, які описують флуктуаційні коливання, або в характеристиках як регулярної, так і стохастичної складових. Показано, що оцінка зміщення має порядок малості $O(N^{-2})$, а оцінка дисперсії має порядок малості $O(N^{-3})$. Проведено дослідження оцінювання функції математичного сподівання та її коефіцієнтів Фур'є при невідомому періоді нестационарності, отримано формули для зміщення та дисперсії оцінок функції математичного сподівання та її коефіцієнтів Фур'є. Також, досліджено слушність функції математичного сподівання, її коефіцієнтів Фур'є, кореляційної функції та її кореляційних компонентів за відомої величини періоду нестационарності. Встановлено, що до періодичної нестационарності

другого порядку (прихованої періодичності) призводять взаємні кореляції між модулюючими процесами.

Четвертий розділ присвячений методам виявлення періодичної нестационарності ПНВС у частотній області. Розглянуто властивості їх спектральних характеристик. Показано, що частотний діапазон, в якому миттєва спектральна густина ПНВС змінюється за часом, визначається косинусними перетвореннями від косинусних і синусних кореляційних компонентів. Сформовано компонентні статистики для визначення частотного діапазону та частоти таких змін. Досліджено властивості оцінок базової частоти ПНВС, отримано залежності для зміщення та дисперсії компонентних оцінок базової частоти. Показано, що зміщення оцінки, яка знаходиться за статистикою косинусної складової, залежить від нульового і косинусних кореляційних компонентів, а за статистикою синусної складової – від синусних кореляційних компонентів. Обидва зміщення мають порядок $O(N^{-2})$. Отримано формули для зміщення та дисперсії дискретних оцінок базової частоти за умови відсутності накладання.

У *п'ятому розділі* розроблена модель ПНВС на основі перетворення Гільберта та аналітичного сигналу. Представлено мультиплікативну модель діагностичного сигналу. Доведено ряд теорем щодо автокореляційних функцій такого сигналу та його перетворення Гільберта а також їх взаємокореляційних функцій. Показано, що аналітичний сигнал, побудований з необробленого сигналу та його перетворення Гільберта є комплекснозначним ПКВП, дисперсія аналітичного сигналу дорівнює сумі дисперсій сигналу та його перетворення Гільберта. Математичне сподівання суми квадратів сигналу та його перетворення Гільберта (так званий “квадрат обвідної”) дорівнює подвоєній дисперсії сигналу, амплітуда гармонік якого визначається амплітудою квадрата функції, що описує низькочастотну регулярну несучу. Показано, що функції взаємної кореляції періодично змінюються в часі, для компонентів з різними номерами порядків несучої. Саме ці кореляції утворюють періодичні компоненти кореляційної функції сигналу. Показано, що квадратури модулюючого процесу можна розділити за допомогою перетворення Гільберта компонент вищих порядків.

Розглянуто модель ПНВС з високочастотною амплітудно-фазовою модуляцією несучої та проведено її теоретичний аналіз. Детально досліджено випадок сигналу з амплітудно-фазовою вузькосмуговою гармонійною модуляцією несучої представленої квадратурною моделлю. Показано, що авто- і взаємокореляційна функції квадратур є парами перетворення Гільберта.

Досліджено випадок широкопasmової високочастотної амплітудно-фазової модуляції багатокomпонентного сигналу. Отримано представлення для взаємкореляційних функцій сигналу та його перетворення Гільберта. Показано, що при фільтрації сигналу фільтром з прямокутною передаточною функцією не лише зменшується потужність стаціонарного фону, а також зменшуються величини амплітуд гармонік дисперсії, якщо корельовані компоненти спектру сигналу не потрапляють в смугу пропускання фільтра.

Розглянуто вузькосmову модуляцію багатокomпонентного сигналу, представляючи кожен модулюючий процес формулами Райса.

Проведено симуляцію широкопasmового високочастотного модульованого ПНВС та порівняння отриманих оцінок кореляційних компонент з теоретично заданими, що показали добру відповідність.

У шостому розділі наведено результати обробки реальних діагностичних сигналів з використанням запропонованої моделі ПНВС. Наведено структурну схему ПНВС-аналізу реальних часових послідовностей.

Наведено результати обробки та аналізу сигналу віброприскорення підшипникового вузла декантера. Досліджено структуру взаємних кореляцій модулюючих складових на основі аналізу 19 спектральних компонент, побудовано матрицю кореляцій розмірами (19x19) та її матрицю нормалізованих коефіцієнтів кореляцій. Запропоновано індикатор нестационарності сигналу для оцінки ступеня розвитку дефекту. Показано, що кореляційні зв'язки між спектральними компонентами з різними частотами зникають залежно від різниці між номерами їх порядків. Показано, що вибір смуги обробки ПНВС слід проводити на основі величини нормованого коефіцієнта кореляції між спектральними компонентами, що знаходяться на протилежних краях смуги пропускання. Проведено порівняння отриманих результатів з результатами методу "квадрату обвідної".

Наведено результати застосування моделі ПНВС для аналізу експериментальних даних, отриманих у Case Western Reserve University, що використовуються у якості неформальної бази сигналів для тестування методик обробки сигналів вібродіагностування. Виконано детальний аналіз сигналів для підшипника кочення з дефектами розміром 0,18 мм і 0,36 мм на зовнішньому кільці. Також наведено результати обробки сигналів з бази Case Western Reserve University, котрі класифікуються як такі, що не дозволяють виявити сигнатури дефектів сучасними методами обробки. Показано, що застосування запропонованих у роботі моделі і методики обробки даних дозволяє виявити у цих сигналах ознаки дефектів та достовірно визначати величини відповідних індикаторів.

Наведено результати застосування моделі ПНВС для раннього виявлення дефекту (тріщини) у матеріалі Д16Т шляхом аналізу оптичного спекл- сигналу зображень поверхні зразка при статичному навантаженні. Показано ефективність запропонованої моделі та методики обробки діагностичного ПНВС сигналу для системи з статичним навантаженням. Наведено карти кореляцій у просторі сигналу та визначено на основі цих даних величину індикатора нестационарності за різної величини навантаження зразка. Продемонстровано високу чутливість індикаторів ступеня розвитку дефекту та отримано відношення сигнал/шум більше 10 при визначенні кореляційних складових вищих порядків.

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 до дисертаційної роботи 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 ПНВС та методів їх аналізу, алгоритмічного забезпечення для обробки діагностичних сигналів різного походження. Це дає можливість виявляти сигнал від дефектів 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 держбюджетних тем.

Практична цінність запропонованих у дисертаційній роботі моделей періодично нестационарних випадкових сигналів, методів їх декомпозиції та аналізу для виявлення, локалізації та оцінювання ступеня розвитку дефектів в механізмах підтверджується результатами їх практичного використання при

проведенні діагностичних робіт на підприємствах в Україні, що підтверджується відповідними актами.

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 10 статей включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science (з них, 6 статей віднесено до квартилю Q1-Q2, 4 – до квартилю Q3), та 44 публікації у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій (з них 11 публікацій включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science), 4 патенти. Загалом 21 публікація, що відображає основні результати роботи, включено до наукометричної бази Scopus та/або Web of Science.

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.

По автореферату дисертації.

1. Стор.4 (дисертація стор. 45).

Об'єктом дослідження - є діагностичні сигнали А треба було - фізичні явища або процеси в машинах та механізмах

2. Стор.20

Теорема. Аналітичний сигнал $\zeta(t) = \xi(t) + \eta(t)$... а треба $\zeta(t) = \xi(t) + i\eta(t)$

По тексту дисертації.

Стор. 58.

1. Тривалість еталонного (опорного) періоду спостереження.

Яким чином цей період визначити в самонавчальних системах ???

(Наприклад, такою системою є система діагностування Expert Alert).

2. У роботі замало уваги приділено порівнянню методів виявлення прихованих періодичностей з тими, що вже описані в літературі.

Наприклад, Стор.69. «...Проте, у межах лінійної моделі унаслідок її основних властивостей в принципі неможливо описати чи представити окремий процес зародження і розвитку дефекту як нової сукупності», питання дискусійне, оскільки лінійні випадкові процеси, що відносяться до конструктивних методів задання випадкових процесів, можуть бути використані для рішення таких задач.

3. У роботі недостатньо уваги приділено опису властивостей оцінок дисперсії аналізованих числових рядів отриманих методом, який в літературі називають “квадратом обвідної”.

4. На стор. 206 автор стверджує, що амплітуди гармонік дисперсії визначаються взаємними кореляціями квадратур і є меншими за потужність стаціонарного фону, але не наводить їх кількісного порівняння.

5. На стор. 265 автор посилається на використання експериментальних даних вібраційних сигналів підшипників з дефектами отриманих з Case Western Reserve University без детального опису схеми проведення експерименту.

6. При описі обробки та аналізу двомірних спекл-сигналів (розділ 6) недостатньо уваги приділено визначенню їх імовірнісних характеристик.

7. У роботі зустрічаються описки, орфографічні та граматичні помилки.

8. Загальні висновки

Вищевказані 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, 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,
провідний науковий співробітник
відділу електромеханічних систем
Інституту електродинаміки НАН України,
доктор технічних наук, ст.н.с.**

 Зварич В.М.

В. Зварича засвідчую
Підпис
Начальник
Відділу Кривошляк І.В.

