

**ВІДГУК**

офіційного опонента,  
професора кафедри комп'ютерних наук  
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя,  
доктора технічних наук, професора  
**Литвиненка Ярослава Володимировича,**  
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**

Рання діагностика складних систем та їх механізмів, дозволяє забезпечувати їх надійне функціонування, обслуговування та вчасний ремонт і можлива з використанням відповідних програмно-апаратних діагностичних комплексів. Побудова ефективних комплексів, які дозволяють здійснювати достовірну діагностику є важливою, актуальною науковою проблемою. При цьому для вчасного, об'єктивного діагностування складних систем використовуються різні підходи, що полягають у аналізі діагностичних сигналів різного походження. Побудова програмно-алгоритмічного забезпечення для аналізу таких діагностичних сигналів передбачає створення математичних моделей та методів на базі яких буде проводитись діагностика.

Розробка математичних моделей багатокомпонентних нестационарних сигналів зі складними взаємними модуляціями та методології їх декомпозиції і аналізу є базисом для аналізу діагностичних сигналів при моніторингу загального стану механізмів, виявлення, локалізації та оцінювання ступня розвитку дефектів у них. Виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку є критично важливим для отримання коректної оцінки надійності механізму. Це дозволяє забезпечити оптимальну організацію планів ремонтів та обслуговування механізмів. Недооцінка (чи не виявлення) дефектів на ранній стадії їх розвитку призводить до завищення отриманої оцінки надійності роботи механізму, що підвищує ризик аварійних ситуацій.

Дана дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми розробки 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, а дослідження їх кореляційно-спектральної структури дає можливість виявляти та встановлювати типи дефектів у механізмах, їх локалізацію та оцінювати ступінь розвитку. Враховуючи вище сказане дана дисертаційна робота є актуальною.

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, держреєстраційний 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-вимірвальна 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 Олега Васильовича Личака є обґрунтовані, 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, комп’ютерного моделювання, виконанням математичного моделювання сигналів та досліджень практичних діагностичних сигналів.

*Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій* забезпечено використанням методів теорії сигналів, сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень, публікаціями у провідних світових журналах, широким обговоренням висунутих наукових положень та отриманих висновків на багатьох міжнародних та національних науково-технічних конференціях, проведенням відповідних симуляцій та практичних експериментальних робіт. Отримані результати відповідають висунутих теоретичним положенням.

### 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;

- встановлено, що до періодичної нестационарності 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 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 модуляції, 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 зникаючими осцилюючими функціями часового зсуву, що зумовлює схожу форму кореляційних компонентів, а інтервал зникання кореляційних компонентів є набагато більшим ніж період нестационарності.

#### **4. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам**

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка містить вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел зі 258 найменувань та 10 додатків на 24 сторінках. Дисертації має 344 сторінки, з яких 292 містять основний текст. У роботі є 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 огляду сучасних стандартів структури підтримки життєвого циклу механізмів, сучасних моделей діагностичних сигналів та методів їх обробки. У розділі 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. Автором розглянуто різні типи математичних моделей діагностичних сигналів та методи їх аналізу. Зазначено, що найбільш близькими моделями обробки діагностичних сигналів механізмів є моделі циклостационарних процесів та періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП), а з методів обробки діагностичних сигналів – метод “квадрату огинаючої”.

У *другому розділі* розглянуто математичні моделі поведінки нелінійних динамічних систем зі збуренням на основі синергетичного підходу. Розглянуто реакцію нелінійних динамічних систем при переході до якісно нового стану в околі “точки біфуркації” системи. Показано, що такий перехід супроводжується складними нестационарними коливаннями, що містять одночасно коливні та випадкові складові, та складні взаємні модуляції між ними. Тобто поява і розвиток 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 оцінкам періоду періодично нестационарного випадкового сигналу та дослідженню оцінок статистичних параметрів періодично нестационарного випадкового сигналу ПНВС. 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. Отримано формули для зміщення та дисперсії оцінок кореляційної функції та кореляційних компонентів за відомої величини періоду нестационарності. Показано, що до періодичної нестационарності другого порядку (прихованої періодичності) призводять взаємні кореляції між випадковими процесами, що модулюють компоненти несучої частоти.

*Четвертий розділ* присвячений методам виявлення періодичної нестационарності ПНВС у частотній області. Встановлено, що частотний діапазон часових змін миттєвої спектральної густини ПНВС визначається косинусними перетвореннями від косинусних і синусних кореляційних компонентів. Запропоновано компонентні статистики для оцінювання базової частоти ПНВС. Отримано формули для величин зміщення та дисперсії оцінок базової частоти ПНВС використовуючи компонентну статистику. Встановлено, що зміщення оцінки, яка знаходиться за косинусною складовою, залежить від нульового і косинусних кореляційних компонентів, а за статистикою синусної складової – від синусних кореляційних компонентів. Сформульовано умову відбору сигналу, для якої відсутності ефекти накладання і просочування частот. Отримано формули для зміщення та дисперсії дискретних оцінок базової частоти за умови відсутності просочування, показано що оцінки зміщення мають порядок малості  $O(N^{-2})$ .

*У п'ятому розділі* представлено розроблену модель ПНВС на основі перетворення Гільберта та аналітичного сигналу. Доведені теореми щодо автокореляційних і взаємокореляційних функцій моделі ПНВС і його перетворення Гільберта. Показано, що аналітичний сигнал, побудований з сигналу та його перетворення Гільберта є комплекснозначним ПКВП, а його дисперсія рівна сумі дисперсій сигналу і його перетворення Гільберта. Математичне сподівання суми квадратів сигналу і перетворення Гільберта (так званий “квадрат обвідної”) дорівнює подвоєній дисперсії сигналу. Амплітуди гармонік “квадрату обвідної” визначаються амплітудами квадрату функції, що описує низькочастотну регулярну несучу. Показано, що функції взаємної кореляції утворюють періодичні компоненти кореляційної функції сигналу. Показано, що демодуляцію квадратур модулюючих процесів можна провести використовуючи перетворення Гільберта високочастотних компонент сигналу.

Розглянута модель ПНВС з високочастотною амплітудно-фазовою модуляцією несучої і виконано її теоретичний аналіз. Виконано теоретичний аналіз сигналу у випадку амплітудно-фазової вузькосмугової гармонійної модуляції несучої, представленої квадратурною моделлю.

Виконано теоретичний аналіз випадку широкосмугової високочастотної амплітудно-фазової модуляції багатокomпонентного сигналу. Отримано представлення для взаємкореляційних функцій сигналу та його перетворення Гільберта. Показано, що встановлення параметрів смуги фільтрації сигналу повинно виходити з умови їх перекривання корельованих компонент сигналу. Розглянуто вузькосмугову високочастотну модуляцію багатокomпонентного сигналу, представляючи кожен модулюючий процес формулами Райса. Наведено результати симулювання та обробки симульованого сигналу.

У шостому розділі наведено результати обробки реальних сигналів.

Наведено покроковий алгоритм обробки сигналів на основі запропонованої моделі багатокomпонентних ПНВС і методики обробки сигналів. Представлено результати обробки та аналізу сигналу віброприскорення підшипникового вузла механізму декантера. Детально розглянуто структуру взаємних кореляцій високочастотних модулюючих складових спочатку у трьох виділених вузьких смугах. Також проведено покроковий аналіз сигналу у складі 19 спектральних смуг, побудовано матриці кореляцій розмірами (19x19) та нормалізованих коефіцієнтів кореляцій. Матриця кореляцій також представлена картою кореляцій. Розраховано оцінки індикатора нестационарності вібросигналу для різних величин смуг пропускання (числа спектральних компонент взятих до уваги при обробці). Показано, що кореляційні зв'язки між спектральними компонентами з різними частотами зникають 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.

Виконано обробку вібросигналу декантера, отримано залежності “спектрального ексцесу” від розміру вибірки сигналу для пошуку “інформативної смуги” частот у методі “квадрату обвідної”. Показано, що отримані методом “квадрату обвідної” величини оцінок амплітуд суттєво залежать від розміру вибірки сигналу, отже є неслухними.

Наведено результати обробки даних вібраційних сигналів, отриманих з бази Case Western Reserve University, що використовуються як неформальний еталон сигналів для тестування методологій обробки сигналів вібродіагностування. Представлено результати аналізу сигналів для підшипника кочення з дефектом розміром 0,18 мм та з дефектом розміром 0,36 мм на зовнішньому кільці. Отримано оцінки індикаторів першого та другого порядку для цих сигналів. Показано, що індикатор другого порядку має вищу чутливість до приросту ступеня розвитку дефекту ніж індикатор першого порядку. Також наведено результати обробки сигналів з бази Case Western Reserve University, котрі представлені на сайті як такі,

для яких не вдалося виявити сигнатури дефектів. Визначено для них величини індикатора першого порядку.

Наведено результати обробки оптичних спекл-сигналів зображень шорсткої поверхні зразка при стандартних випробуваннях на тріщиностійкість за статичного навантаження як ПНВС. Показано ефективність запропонованої моделі ПНВС та методики 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.

Слід відмітити, що отримані висновки за результатами проведених досліджень, мають належний науковий рівень та відповідають вимогам до результатів докторської дисертації.

У *додатках* наведені: список публікацій здобувача, окремі виведення формул та акти, що засвідчують впровадження результатів роботи.

## **5. Оформлення дисертації та автореферату**

*Автореферат* відображає в повному обсязі основні наукові результати дисертаційної роботи, практичну значущість та висновки.

*Дисертаційна робота* та автореферат оформлені у відповідності з чинними вимогами, що ставляться до докторських дисертаційних робіт. Дисертаційна робота має завершену обґрунтовану структуру та форму представлення, що повною мірою розкриває досягнуту мету та виконані завдання дослідження.

Робота та автореферат написані логічно, доступно на високому науковому рівні.

Результати кандидатської дисертації в докторській дисертації не використовувались.

## **6. Практичне значення результатів дисертаційної роботи**

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у створенні моделей діагностичних сигналів як ПНВС та методів їх аналізу на основі перетворення Гільберта та аналітичного сигналу, відповідного алгоритмічного забезпечення для обробки сигналів. Слід зазначити, що запропоновані моделі і методи дозволяють виявляти та оцінювати сигнали від дефектів у механічних системах на ранніх стадіях розвитку, вибирати параметри обробки цього сигналу, отримувати оцінки розвитку дефектів. Результати практичних досліджень використано у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України при виконанні ряду держбюджетних тем.

Практична цінність запропонованих у дисертаційній роботі моделей періодично нестационарних випадкових сигналів, методів їх обробки для виявлення, локалізації та оцінювання ступеня розвитку дефектів в механізмах

підтверджується результатами їх впровадження в практику діагностичних робіт на підприємствах в Україні, що підтверджується відповідними актами.

### **7. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях**

Результати дисертаційної роботи представлені у 77 наукових праць, серед яких 29 у наукових фахових виданнях України та закордонних виданнях, 44 публікації у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій та 4 патенти України. Загалом 21 публікація, що відображає основні результати роботи, включено до наукометричної бази Scopus (6 статей віднесено до квартилю Q1-Q2, 4 – до квартилю Q3, 11 – праці конференцій).

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 та пройшли необхідну апробацію.

### **8. Зауваження до дисертаційної роботи та втореферату.**

1. Деякі рисунки в авторефераті погано читабельні, наприклад: рис. 13, стр. 29; рис. 14, стр. 30, автореферату. Це саме зауваження стосується і дисертаційної роботи, наприклад: рис. 2.5 стр. 79; рис. 2.6, стр. 80; рис. 5.4.3, стр. 221, рис. 6.3.3, стр. 266.

2. У роботі слід було б детальніше охарактеризувати недоліки “методу обвідної”, котрий широко використовується при обробці вібрисигналів.

3. У роботі багато уваги приділено теоретичним викладкам аналізу різних видів і підвидів модуляції ПНВС, натомість опис результатів обробки практичних експериментальних сигналів виглядає дещо спрощеним.

4. Запропонований в роботі метод визначення інформативної смуги частот доцільно було б описати детальніше.

5. У роботі результати обробки вібраційних сигналів підшипників з дефектами отриманих з бази даних Case Western Reserve University і спекл-сигналу представлені без покрокової деталізації.

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

### **9. Загальні висновки**

Дисертаційна робота Личака Олега Васильовича на тему: “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 важливу науково-прикладну проблему яка полягає у 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, на основі якої можна встановлювати типи дефектів у механізмах на ранніх стадіях розвитку, їх локалізацію та оцінювати ступінь розвитку.

Автореферат дисертаційної роботи відповідає змісту дисертації і відображає його в повному обсязі. Ознаки академічного плагіату в роботі відсутні.

Опубліковані Личаком Олегом Васильовичем наукові праці за темою дослідження повністю відображають основні положення дисертації та пройшли необхідну апробацію. У докторській дисертації не використовуються наукові положення, матеріали та висновки кандидатської дисертації здобувача.

Зважаючи на актуальність дисертаційного дослідження, новизну теоретичних положень, практичну цінність результатів, рівень висвітлення результатів дослідження в публікаціях наукових видань, вважаю, що дисертаційна робота 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,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри комп'ютерних наук

Тернопільського національного технічного

університету імені Івана Пулюя

Я.В. Литвиненко

Підпис професора Литвиненка Я.В. засвідчую:

Вчений секретар Тернопільського національного технічного

університету імені Івана Пулюя

кандидат технічних наук, доцент



Г.М. Крамар