

## ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу

КУРАПОВА Павла Ростиславовича

“Взаємоспектральний аналіз періодично нестационарних випадкових процесів”,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань

11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

**Актуальність теми дисертації.** Властивості повторюваності та стохастичності характерні для багатьох складних випадкових процесів, явищ та сигналів, що зустрічаються в природі та діяльності людини. Аналіз цих процесів, з огляду на їхню складність, вимагає розроблення відповідних методів статистичного аналізу та моделювання стохастичних сигналів, за допомогою яких можна адекватно описати структуру явища, якому притаманні такі властивості. Слід зазначити, що використання імовірнісного підходу, який ґрунтується на моделях у вигляді періодично нестационарних випадкових процесів (ПНВП), до аналізу та моделювання таких сигналів дає змогу повніше описати властивості фізичних систем як з врахуванням детерміністичних законів так і з врахуванням стохастичної частини, що може нести як корисну інформацію про фізичну систему, так і інформацію спричинену випадковими завадами та збуреннями. Класичними прикладами таких процесів є варіації власного магнітного та електричного полів Землі, хвилювання поверхні моря, вібраційні та інші сигнали в системах технічної діагностики та багато інших. Усі вищенаведені фактори дозволяють стверджувати, що обрана тематика дослідження є актуальною.

**Наукова новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів.** Щодо наукової новизни, то вона перш за все полягає у розробленні нового підходу до побудови ймовірнісних моделей сигналів у вигляді їх гармонічного представлення ПНВП через стаціонарні стаціонарно зв'язані випадкові процеси та побудові нових параметричних моделей сигналів через стаціонарні зв'язані компоненти сигналу. При цьому здобувачем вперше:

– обґрунтовано ПНВП-модель випадкових вібраційних сигналів на основі представлення через стаціонарні стаціонарно зв'язані процеси;

- проаналізовано метод виділення стаціонарно зв'язаних квадратурних складових на основі перетворення Гільберта;
- отримано та проаналізовано властивості зміщення і дисперсії оцінок імовірнісних характеристик стаціонарно зв'язаних компонентів гармонічного представлення ПНВП, виділених запропонованим методом, і на цій основі обґрунтовано параметри обробки, що забезпечують наперед задану точність їх виділення;
- досліджено властивості зміщення й дисперсії оцінок ймовірнісних характеристик ПНВП при їх обчисленні на основі гармонічного представлення, що описують їх залежності від довжини відрізка реалізації та параметрів, які визначають кореляційну структуру, що дало змогу кількісно оцінити вірогідність результатів обробки, які забезпечують наперед задану її точність;
- обґрунтовано новий критерій для діагностики технічного стану об'єктів на основі авто- та взаємкореляційних функцій стаціонарних компонентів стохастичної складової вібродинамічного сигналу.

**Наукова обґрунтованість та достовірність представлених теоретичних та експериментальних результатів досліджень.** Проведено детальний аналіз відомих результатів теоретичних та експериментальних досліджень по проблемі за літературними джерелами. Отримані результати порівнювалися з відомими теоретичними та практичними результатами, отриманими іншими авторами. Проведено порівняння отриманих теоретичних розрахунків з результатами опрацювання реальних сигналів та відомих з наукової літератури експериментальних досліджень, свідчать про високий ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації Курапова П. Р.

Достовірність сформульованих у роботі висновків забезпечується також фізично коректною постановкою задач математичного моделювання і обробки діагностичних сигналів, використанням відомих методів розв'язування задач несуперечливістю отриманих результатів з фізично очікуваними та відповідністю до натурної верифікації об'єктів діагностування.

**Рівень виконання поставленого наукового завдання.** Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні, написана технічно грамотно,

досить легко читається та сприймається спеціалістами відповідного профілю. Викладення матеріалу логічне і послідовне, висновки до розділів і в цілому до дисертації базуються на отриманих результатах теоретичних розробок і аналізу реальних сигналів.

Основні положення та висновки дисертаційної роботи висвітлені в рецензованих наукових публікаціях, у тому числі цитованих в наукометричних базах Scopus і WoS. Крім того, результати дисертаційної роботи пройшли апробацію під час представлення матеріалів доповідей та їх обговорення на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях.

**Рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.** Здобувач на належно високому рівні оволодів методологією наукового пошуку, що зокрема проявилось у певній логічній послідовності проведення наукового дослідження, внаслідок чого забезпечено його конкретність, поетапність та обґрунтованість. Мета і завдання дослідження сформульовані методично грамотно з урахуванням результатів і встановлених фактів, які були отримані іншими дослідниками, що дозволило дисертанту визначити пріоритетні напрямки досліджень та нез'ясовані раніше питання, а саме – наукове обґрунтування та розвиток методів обробки багатокomпонентних періодично нестационарних корельованих випадкових сигналів.

Основні наукові положення та висновки відповідають поставленим завданням дослідження, а саме: провести теоретичні дослідження властивостей гармонічного представлення ПНВП та розробити методи виділення їх стаціонарно зв'язаних компонентів на основі смугової фільтрації та перетворення Гільберта; проаналізувати похибки виділення стаціонарно зв'язаних компонентів ПНВП, що отримуються на основі розроблених методів; розробити методи симулювання ПНВП з наперед заданими імовірнісними характеристиками та оцінювання точності такого симулювання; проаналізувати залежності якості оцінювання ймовірнісних характеристик від довжини відрізка реалізації, кроку дискретизації та параметрів апроксимацій, запропонованих для опису кореляційної структури ПНВП; проаналізувати вплив ефектів елайзингу (просочування енергії гармонік і накладання гармонік) при виділенні стаціонарних складових ПНВП на основі результатів комп'ютерного-імітаційного моделювання; розробити нову методологію статистичного аналізу вібраційних сигналів і на її основі розробити нові діагностичні індикатори.

*Об'єктом* дослідження дисертантом обрано сигнали від випадкових процесів зі стохастичною повторюваністю, а *предметом* досліджень – методи статистичного аналізу ПНВП на основі їх представлення через стаціонарно зв'язані випадкові процеси та оцінювання показників якості їх виділення.

Поставлені завдання Курапов П. Р. вирішував завдяки правильно обраним методам: методу виділення стаціонарно зв'язаних компонентів гармонічного подання ПНВП на основі смугової фільтрації; методу виділення стаціонарно зв'язаних квадратурних складових сигналів ПНВП на основі перетворення Гільберта; когерентному та компонентному методам статистичного аналізу періодично корельованих випадкових процесів для визначення статистично-ймовірнісних характеристик виділених стаціонарно зв'язаних компонентів; методу параметричного моделювання сигналів зі стохастичною повторюваністю; методу комп'ютерного імітаційного симулювання для верифікації теоретичних положень; методу верифікації теоретичних положень на натурних даних.

**Теоретичне та практичне значення отриманих результатів.** Розвинуті Кураповим П. Р. теоретичні підходи у поєднанні з відповідним програмним забезпеченням розширюють можливості діагностики та моніторингу стану технічних систем що характеризуються одночасно стохастичністю та періодичною (квазіперіодичною) повторюваністю процесів. Запропонований підхід до статистичного аналізу вібраційних сигналів, який полягає у розділенні сигналу на смуги частот і оцінюванні квадратур цих смугу. На основі кореляційних функцій виділених квадратур можуть бути побудовані нові індикатори, які враховують взаємкореляційні зв'язки виділених стаціонарних компонент, для раннього виявлення дефектів у обертових вузлах.

Розроблений дисертантом пакет комп'ютерних програм для аналізу, моделювання та дослідження стохастичних процесів впроваджено у навчальний процес на кафедрі прикладної математики Національного університету “Львівська політехніка”. Практичні результати, отримані у дисертаційній роботі, використано у науково-дослідній роботі відділу “Методів та засобів відбору та обробки діагностичних сигналів” Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. Розроблене автором програмне забезпечення і методика використовувались ним при виконанні тем державного замовлення.

Практична значимість роботи підтверджена актами впровадження, які додаються до роботи.

**Відповідність роботи вимогам, які ставляться до дисертації.** За важливістю розв’язаної наукової задачі, повнотою її теоретичного та експериментального обґрунтування, обсягом проведених досліджень і новизною сформульованих висновків дисертаційна робота Курапова П. Р. відповідає вимогам “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12 січня 2017 р. № 40.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У роботі відсутні порівняльні оцінки з іншими математичними моделями та методами виявлення дефектів зубчатого колеса на основі аналізу вібраційного сигналу.

2. Автор стверджує, що на основі дослідження властивостей зміщення й дисперсії оцінок ймовірнісних характеристик ПНВП вдалося кількісно оцінити вірогідність результатів, проте не вказує кількісних значень.

3. Недостатньо обґрунтована модель Райса для аналізу вузько смугових однокомпонентних ПНВС.

4. У третьому висновку до розділу 3 автор стверджує, що проведено порівняння результатів з відомими літературними даними, проте відсутні кількісні оцінки.

5. У висновках до роботи (стор. 125) говориться, що окреслені можливості та границі застосування у вібраційній діагностиці “методу обвідної”. Проте, на мою думку, в роботі потрібно б було більш чітко описати, що саме автор розуміє під цим методом.

6. Автор стверджує, що на основі оцінок імовірнісних характеристик стаціонарних стаціонарно зв’язаних компонентів гармонічного представлення компонентів ПНВП, виділених запропонованим ним методом, обґрунтовано параметри обробки, що забезпечують наперед задану точність. Проте не вказано, які параметри обробки розглядаються і наскільки зросла точність їх виділення.

## Висновок.

Зазначені недоліки не впливають на високу оцінку роботи в цілому.

Дисертаційна робота Курапова Павла Ростиславовича “Взаємоспектральний аналіз періодично нестационарних випадкових процесів” є завершеною науковою роботою, у якій розв’язана важлива в науковому, так і в практичному відношенні задача побудови ймовірнісних моделей сигналів у вигляді їх гармонічного представлення ПНВП через стаціонарні стаціонарно зв’язані випадкові процеси та побудові нових параметричних моделей сигналів через стаціонарно зв’язані компоненти сигналу, за новизною отриманих результатів та ступенем їх обґрунтованості відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. “Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій”, і вимогам “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 11 “Математика та статистика” за спеціальністю 113 “Прикладна математика”.

Офіційний опонент:

завідувач відділу інформаційних технологій

дистанційного зондування

Фізико-механічного інституту

ім. Г. В. Карпенка НАН України,

доктор технічних наук, професор

Богдан РУСИН

