

РЕЦЕНЗІЯ

доктора фізико-математичних наук, професора

МЕДИНСЬКОГО Ігоря Павловича

на кваліфікаційну роботу

КУРАПОВА Павла Ростиславовича

на тему: **“ВЗАЄМОСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРІОДИЧНО НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ”**, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 *Прикладна математика*, галузь знань 11 *Математика та статистика*.

У результаті вивчення рукопису дисертаційної роботи **Курапова Павла**, яка складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, бібліографії використаних джерел та додатків, а також ознайомлення із опублікованими роботами здобувача за темою дисертаційного дослідження, слід відзначити наступне.

Актуальність теми дослідження та її зв'язок з планами роботи кафедри. Робота присвячена *важливій та актуальній науковій проблемі* дослідження математичної моделі сигналів для стохастичних систем у вигляді періодично нестационарного випадкового процесу. У ній *отримав подальший розвиток* імовірнісний підхід, що ґрунтується на моделях у вигляді періодично нестационарних випадкових процесів та методів їх статистичного аналізу на основі представлення через стаціонарні зв'язані випадкові процеси. Для цього було *запропоновано і обґрунтовано* новий метод виокремлення стаціонарних зв'язаних випадкових процесів, що використано для побудови параметричних моделей стохастичних сигналів. *Розроблено* метод, що використовує лінійну фільтрацію та перетворення Гільберта є якісно кращим у порівнянні із відомими методами декомпозиції нестационарних випадкових процесів, а саме за емпіричну декомпозицію мод і гільбертову вібраційну декомпозицію, оскільки його можна коректно використовувати у випадку низькочастотної та високочастотної модуляції когерентних або некогерентних гармонік для класу лінійних гауссових періодично нестационарних випадкових процесів.

Тематика дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри прикладної математики «Математичне моделювання складних систем». Дисертаційні дослідження виконувались в рамках державних бюджетних тем Національної академії наук України “Розроблення інформаційних технологій та засобів вібраційної діагностики на основі періодично нестационарних нелінійних моделей з використанням перетворення Гільберта” (державний реєстраційний номер 0119U101061), “Розроблення методів кореляційного

аналізу поліритмічної структури вібраційних сигналів для підвищення ефективності діагностики елементів вузлів механізмів з різними швидкостями обертання” (0122U002138).

Оцінка наукового рівня дисертації та публікацій здобувача. Метою роботи є побудова параметричної математичної моделі стохастичних сигналів та методів їх статистичного аналізу на основі представлення через стаціонарні стаціонарно зв'язані випадкові процеси.

Для досягнення поставленої мети здобувач розв'язав такі задачі:

провів

- теоретичне дослідження властивостей гармонічного представлення періодично нестаціонарного випадкового процесу;
- аналіз похибок виділення стаціонарних стаціонарно зв'язаних компонентів періодично нестаціонарного випадкового процесу, що отримуються запропонованим методом, та визначив клас процесів, для яких похибка виділення є мінімальною;

вивів взаємозв'язки між ймовірнісними характеристиками однокомпонентного періодично нестаціонарного випадкового сигналу представленого моделлю Райса та характеристиками його квадратур;

обґрунтував

- новий метод виділення його стаціонарних стаціонарно зв'язаних компонентів на основі смугової фільтрації та перетворення Гільберта;
- що використання гармонічного представлення моделі періодично нестаціонарного випадкового сигналу дозволяє описати властивості досліджуваного сигналу через властивості його стаціонарних складових та зменшити кількість параметрів моделювання, не знижуючи його точності;

проаналізував

- властивості перетворення Гільберта однокомпонентного періодично нестаціонарного випадкового сигналу та дослідив його властивості в залежності від кореляційної структури стохастичних модуляцій;
- на основі результатів комп'ютерного імітаційного моделювання вплив ширини смуги частот модуляційних процесів і відношення їх частот до частоти несучої на точність виділення стаціонарних стаціонарно зв'язаних компонентів періодично нестаціонарного випадкового процесу;
- на основі результатів комп'ютерного імітаційного моделювання вплив ефектів елайзингу (просочування енергії гармонік і накладання гармонік) при виділенні стаціонарних стаціонарно зв'язаних компонентів періодично нестаціонарного випадкового процесу;

розробив новий підхід до статистичного аналізу вібраційних сигналів і на основі запропонованого підходу побудував нові індикатори, які враховують взаємкореляційні зв'язки виділених стаціонарних компонент, для раннього виявлення дефектів у обертових вузлах.

Об'єктом дослідження є сигнали від випадкових процесів зі стохастичною повторюваністю.

Предметом дослідження є методи статистичного аналізу періодично нестационарних випадкових сигналів на основі їх представлення через стаціонарні стаціонарно зв'язані випадкові процеси.

Висновки до дисертації підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень та розроблених засобів. Список використаних джерел свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано сучасні результати наукових досліджень проблеми параметричного моделювання стохастичних сигналів.

За темою роботи опубліковано 19 наукових праць, з них: 1 розділ колективної монографії; 4 статі, з яких 3 індексовані у міжнародній наукометричній базі *Scopus*, 1 у фаховому науковому виданні категорії **Б** із переліку, затвердженого МОН України; 14 матеріалів тез доповідей на конференціях у яких повністю відображені основні наукові результати.

Наукова обґрунтованість отриманих результатів, наукових положень, висновків, рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі **Павла Курапова**, випливають зі створення обґрунтованих математичних моделей для детальнішого дослідження закономірностей низькочастотної модуляції. Несуперечливість отриманих теоретичних результатів підтверджено логічними експериментальними та імітаційними дослідженнями. Наведені в дисертації висновки узагальнюють наукові результати та їх практичну важливість. Також, достовірність отриманих здобувачем результатів засвідчена відповідними актами впровадження, обговоренням матеріалів дисертації на міжнародних науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах кафедри, де отримали позитивну оцінку.

Рівень поставленого наукового завдання та опанування здобувачем методологією наукової діяльності. Наукове завдання, поставлене перед здобувачем, полягало у дослідженні імовірнісної структури сигналів від випадкових процесів зі стохастичною повторюваністю на основі їх представлення через стаціонарні стаціонарно зв'язані випадкові процеси. Вважаю, що це завдання повністю виконано і було досягнуто поставлену мету. Зокрема, у ході розв'язання поставленої наукової задачі здобувачем отримані такі основні наукові результати:

вперше

- виведено та проаналізовано співвідношення, що пов'язують кореляційні та спектральні характеристики вузькосмугових періодично нестационарних випадкових сигналів та їх перетворень Гільберта;
- виведено, що квадратурні складові такого сигналу є стаціонарними стаціонарно зв'язаними випадковими процесами, а їх авто- та взаємкореляційна функції залежать, як від нульових так і від других кореляційних компонентів;
- вивід співвідношень, які доводять, що дійсна частина взаємоспектральної густини квадратурних складових є парною функцією частоти, а уявна частина непарною функцією частоти;
- проаналізовано параметричне моделювання варіацій магнітного поля Землі через виділення стаціонарних квадратур;
- вивів та проаналізував формули дисперсії оцінки взаємкореляційної функції сигналу та його перетворення Гільберта;
- показано, що у випадку вузькосмугової високочастотної амплітудно-фазової модуляції несучих гармонік періодично нестационарного сигналу кореляційна функція даного сигналу та його Гільберт трансформанти є однаковими й тоді так званий квадрат обвідної є випадковим процесом, математичне сподівання якого дорівнює подвоєній дисперсії сигналу та подвійній усередненій за часом потужності сигналу;

отримали подальший розвиток використання періодично нестационарного випадкового процесу, як моделі для побудови нових індикаторів для визначення технічного стану елементів механічних систем.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.

Структура дисертації, мова та стиль викладення відповідають вимогам, щодо оформлення дисертацій доктора філософії. Застосована в роботі наукова термінологія є загальноновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України, зокрема наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та містить усі необхідні структурні елементи.

За актуальністю тематики, обсягом проведених досліджень, науковою новизною отриманих результатів та їх практичним значенням дисертаційна робота **Павла Курапова** відповідає вимогам та паспорту спеціальності 113 *Прикладна математика*.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність розробленого в дисертаційній роботі підходу до статистичного аналізу сигналів полягає в тому, що на основі кореляційних функцій виділених квадратур можуть бути побудовані нові індикатори, які враховують взаємкореляційні зв'язки виділених стаціонарних компонент, що *збільшує та розширює* можливості ранньої діагностики та моніторингу стану деталей обертових вузлів. При тому взаємозв'язок гармонічного та трансляційного представлення періодично нестаціонарного випадкового процесу дає можливість легко комп'ютерно змоделювати періодично нестаціонарний випадковий сигнал з наперед заданими імовірнісними характеристиками, що дозволяє верифікувати методи виділення стаціонарно зв'язаних компонентів сигналу та на основі отриманих параметричних моделей провести тестові дослідження роторних систем. Теоретичні та практичні результати було використано у науково-дослідній роботі відділу “Методів та засобів відбору та обробки діагностичних сигналів” Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Зауваження до дисертації:

1. У роботі вжито термін “стаціонарні стаціонарно зв'язані компоненти періодично нестаціонарного випадкового процесу” який варто було б детально пояснити і обґрунтувати доцільність використання такого складного терміну.

2. У третьому розділі хотілось би побачити більш широкий огляд альтернативних методів декомпозиції і демодуляції нестаціонарних випадкових процесів.

3. У роботі *Javorskyj I.M., Kurapov P.R., Yuzefovych R.M., Covariance characteristics of narrowband periodically non-stationary random signals, Mathematical Modeling and Computing, 2019, Vol. 6 № 2, p. 276–288* здобувач проаналізував на основі комп'ютерного імітаційного моделювання вплив ширини смуги частот модуляційних процесів і відношення їх частот до частоти несучої на точність виділення стаціонарних стаціонарно зв'язаних компонентів ПНВП, але чому в даній роботі ці результати не використані?

4. Властивість 2 у Додатку В с. 168 має оцінку точності, і очевидно є науковим результатом отриманим здобувачем особисто, бажано всі наукові результати давати в основному тексті роботи.

Зазначені зауваження не є принциповими та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальні висновки. Вказані зауваження не знижують позитивної оцінки дисертації в цілому, а також розроблених автором основних наукових висновків та отриманих результатів проведених досліджень. Дисертаційна робота **Павла Курапова** є завершеним науковим дослідженням, в якому розв'язана актуальна наукова задача розроблення підходу до аналізу і параметричного моделювання

сигналів зі стохастичною повторюваністю, що ґрунтується на представленні періодично нестационарних випадкових процесів через стаціонарно зв'язані випадкові процеси. Також, в ній вивчено актуальну наукову задачу, а її розв'язання надає принципово нові можливості для дефектоскопії оскільки на основі характеристик модуляцій можна побудувати нові індикатори, які враховують взаємкореляційні зв'язки виділених стаціонарних компонент для виявлення та типізації дефектів у обертових вузлах.

На підставі детального аналізу представленої дисертаційної роботи, зокрема її актуальності, глибини опрацювання поставленої проблеми аналізу і параметричного моделювання сигналів зі стохастичною повторюваністю, обґрунтованості основних положень і висновків, наявності наукової та практичної цінності, можна зробити висновок, що робота відповідає вимогам, які сформовані до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії та встановлені наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та КМ від 12 січня 2022 р. № 44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» з останніми змінами внесеними постановою КМ № 341 від 21.03.2022.

Кваліфікаційна робота **Павла КУРАПОВА** за темою **“Взаємоспектральний аналіз періодично нестационарних випадкових процесів”** є завершеною науковою роботою, а її автор **Павло КУРАПОВ**, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 *Прикладна математика*, галузь знань 11 *Математика та статистика*.

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук, доц.,
проф. кафедри прикладної математики
Інститут фундаментальних наук та прикладної математики
Національний університет “Львівська політехніка”



Ігор МЕДИНСЬКИЙ

Підпис д. ф.-м. н. Мединського І.І. «Засвідчую»
Вчений секретар
Національного університету
“Львівська політехніка”



Роман БРИЛИНСЬКИЙ

"15" червня 2023 р.