

## РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента

**Чепиноги Анатолія Володимировича**

на дисертаційну роботу **СМІРНОВА Данііла Олексійовича**  
«Математичні моделі, методи та засоби виявлення постійного сигналу  
на фоні негаусових корельованих завад» подану на здобуття  
наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 - Інформаційні  
технології за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки»

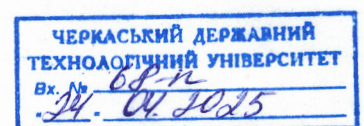
### Актуальність теми дослідження

Розвиток сучасних технічних систем потребує вдосконалення методів статистичної обробки сигналів у складних умовах функціонування. У багатьох практичних задачах, зокрема в інформаційних, радіотехнічних та телекомунікаційних системах, виникає потреба у виявленні сигналів на фоні завад, що мають виражені кореляційні зв'язки та не підпорядковуються нормальному розподілу. Це висуває нові вимоги до побудови математичних моделей і алгоритмів, здатних ефективно працювати в складних завадових умовах, де класичні методи виявляють суттєві обмеження з точки зору практичної реалізації.

Проблемою, що залишається відкритою, є практична складність реалізації традиційних критеріїв якості перевірки статистичних гіпотез при обробці випадкових негаусових процесів, зокрема корельованих. У подібних умовах стандартні методи, орієнтовані на припущення про гаусовий характер щільності розподілу, втрачають свої оптимальні властивості, що знижує загальну ефективність таких систем. Саме тому виникає необхідність у побудові нових теоретичних підходів та практичних розробок, які б враховували негаусові моделі випадкових величин та їх кореляційні зв'язки для адекватного опису структури досліджуваних випадкових процесів.

Проведення досліджень, спрямованих на створення математичних моделей і методів, що базуються на використанні моментів і кумулянтів для опису випадкових величин, дозволяє формалізувати складні сигнально-завадові ситуації та забезпечити синтез ефективних рішень у задачах виявлення сигналів. Альтернативні підходи в рамках наукових досліджень, що орієнтовані на негаусові характеристики випадкових процесів, відкривають нові перспективи для підвищення якості статистичної обробки сигналів, і відповідно, створення якісних технічних систем відповідного класу.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Д.О. Смірнова, у якій розглядаються нові математичні моделі досліджуваних процесів, що базуються на моментно-кумулянтному підході до опису випадкових величин, методи синтезу поліноміальних алгоритмів виявлення сигналів за модифікованим моментним критерієм якості перевірки статистичних гіпотез, засоби комп'ютерного моделювання процесів виявлення сигналів на фоні корельованих негаусових завад, є **актуальною**.



## Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі Д.О. Смірнова розв'язано актуальне науково-прикладне завдання по створенню та впровадженню нових *математичних моделей та методів виявлення сигналів на фоні корельованих негаусових завад*. Основою запропонованих рішень стало використання статистик вищих порядків при застосуванні одновимірних та двовимірних моментно-кумулянтних функцій, що дозволило сформулювати модифікований критерій якості верхньої границі ймовірностей помилок для перевірки статистичних гіпотез, розробити поліноміальні алгоритми прийняття рішень та ефективні засоби комп'ютерного моделювання.

Зокрема автором отримано такі основні наукові результати дисертаційного дослідження:

1. вперше розроблено математичні моделі корельованих негаусових асиметричних, ексцесних та асиметрично-ексцесних випадкових величин, що описують адитивну взаємодію сигналів і завад на основі одновимірного та двовимірного моментно-кумулянтного представлення досліджуваних процесів, що дозволило розширити спектр розв'язуваних задач та модифікувати моментний критерій якості перевірки статистичних гіпотез для побудови поліноміальних розв'язувальних правил виявлення сигналів в складних завадових умовах;
2. вперше запропоновано метод побудови поліноміальних стохастичних розв'язувальних правил виявлення постійних сигналів на фоні корельованих негаусових асиметричних, ексцесних та асиметрично-ексцесних завад, оптимальних за модифікованим моментним критерієм якості перевірки статистичних гіпотез, що дозволило підвищити якість виявлення сигналів в системах контролю, діагностики та моніторингу;
3. удосконалено моментний критерій якості верхньої границі ймовірностей помилок перевірки статистичних гіпотез із врахуванням сумісних моментів та кумулянтів вищих порядків для побудови поліноміальних методів виявлення сигналів на фоні корельованих негаусових завад, що дозволило забезпечити підвищення точності обробки сигналів в комп'ютеризованих системах;
4. удосконалено метод генерації корельованих негаусових випадкових величин на основі полігаусових моделей та застосуванні сумісних моментів та кумулянтів для представлення статистичних зв'язків досліджуваних процесів, що дозволяє проводити аналіз впливу параметрів кореляції та статистик вищих порядків на точність обробки сигналів.

В дисертаційній роботі Д.О. Смірнова отримані нові наукові результати, які в сукупності розв'язують важливу наукову-прикладну задачу.

## Практична цінність та значимість результатів роботи

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає у створенні комп'ютерних засобів моделювання, які забезпечують синтез поліноміальних алгоритмів обробки сигналів в умовах дії корельованих



негаусових завад. Отримані результати дають можливість зменшити ймовірності помилок нелінійних розв'язувальних правил при врахуванні статистик вищих порядків у випадку негаусового розподілу випадкових процесів у порівнянні з відомими результатами для класичних гаусових моделей. Розроблені поліноміальні розв'язувальні правила характеризуються своєю відносно не складною практичною реалізацією і високою ефективністю. Запропонована структурна схема реалізації поліноміальної системи виявлення сигналів, отримані програмні засоби комп'ютерного моделювання процесів обробки сигналів, які забезпечують ефективні рішення широкого спектру прикладних задач в системах технічної діагностики, автоматизованого контролю та управління.

Результати наукового дослідження були використані в науково-дослідних роботах «Моделі, методи та засоби сумісного виявлення сигналів та оцінювання їх параметрів на фоні негаусових завад» (номер державної реєстрації 0122U201835) та «Обчислювальні методи визначення доплерівського зсуву частоти гармонічного сигналу при негаусових завадах» (номер державної реєстрації 0121U114029). Результати роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрі робототехнічних і телекомунікаційних систем та кібербезпеки Черкаського державного технологічного університету.

### **Достовірність отриманих результатів**

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи Д.О. Смірнова є належним чином обґрунтованими та підтвердженими завдяки коректному і аргументованому застосуванню математичного апарату теорії ймовірностей, математичної статистики, *теорії перевірки статистичних гіпотез*. Достовірність отриманих результатів додатково підтверджена шляхом зіставлення теоретичних висновків із результатами експериментальних досліджень шляхом статистичного моделювання за методом Монте-Карло.

### **Структура та зміст дисертаційного дослідження**

Представлена дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складається з 217 стор., у тому числі 155 стор. основного, 6 таблиць, 50 рисунків, список літературних джерел налічує 122 найменувань.

Наведена анотація дисертаційної роботи містить актуальність дослідження, поставлену науково-практичну задачу, отримані наукові та практичні результати.

У вступі роботи наведено обґрунтування актуальності дисертаційного дослідження, об'єкт та предмет, мету та задачі дисертації, наукову новизну та практичне значення результатів, опубліковані праці за тематикою дисертаційного дослідження. Наведено аналіз наукових досліджень у рамках обраної теми дисертації, проаналізовані роботи зарубіжних та вітчизняних вчених, наведена постановка задачі дисертаційного дослідження.

**У першому розділі** дисертаційної роботи здійснено огляд літературних джерел, присвячених задачам виявлення сигналів в умовах завад, а також проаналізовано застосування математичних моделей випадкових процесів і методів статистичної обробки сигналів у контексті загальної теорії перевірки статистичних гіпотез. Розглянуто актуальні проблеми, що виникають при використанні моделей випадкових процесів та методів виявлення у випадку взаємодії сигналів із корельованими негаусовими завадами.

Проведено аналіз типових задач виявлення сигналів у комп'ютеризованих інформаційних системах і в результаті встановлено наявні обмеження традиційних статистичних підходів, які ґрунтуються на ймовірнісних критеріях, заснованих на щільності розподілу випадкових процесів. У зв'язку з цим у роботі обґрунтовано доцільність застосування альтернативної методології, яка використовує моментно-кумулянтне представлення випадкових величин з використанням статистик вищих порядків. Такий підхід дозволяє точніше описати негаусову природу досліджуваних процесів та їх статистичні зв'язки.

Зазначено, що ефективна реалізація такого підходу потребує подальших досліджень, спрямованих на розробку нових математичних моделей корельованих негаусових процесів із застосуванням моментно-кумулянтного опису. Також підкреслено необхідність удосконалення методів обробки стохастичних сигналів з метою підвищення ефективності систем виявлення.

**У другому розділі** дисертаційної роботи обґрунтовано, що задача обробки сигналів в умовах завад має важливе прикладне значення для широкого спектру задач і водночас є складною з точки зору статистичного аналізу. Показано, що для оптимального виявлення сигналів зазвичай застосовується класичний підхід, заснований на порівнянні відношення правдоподібності з певним порогом, який визначається відповідно до обраного критерію якості перевірки статистичних гіпотез. Водночас зазначено, що ефективність цього підходу суттєво знижується у випадках, коли модель досліджуваного процесу є корельованою та характеризується негаусовою щільністю розподілу.

У зв'язку з цим у роботі запропоновано альтернативний підхід, який базується на застосуванні моментно-кумулянтного опису, що дозволяє адекватно описувати властивості випадкових процесів без необхідності знання повного їх імовірнісного опису у вигляді щільності розподілу. В роботі розроблено математичні моделі одновимірних і двовимірних негаусових випадкових величин, що дало змогу розширити множину досліджуваних випадкових процесів. В запропонованих математичних моментно-кумулянтних моделях враховано важливі параметри негаусової щільності розподілу, зокрема коефіцієнти асиметрії, ексцесу, та сумісні моменти та кумулянти, які враховують статистичних зв'язок досліджуваних випадкових величин.

На основі отриманих математичних моделей сформульовано модифікований моментний критерій якості для перевірки статистичних гіпотез, що, у свою чергу, дозволило розробити поліноміальні алгоритми виявлення сигналів на фоні корельованих негаусових завад.

**У третьому розділі** дисертаційної роботи, спираючись на запропоновані моментно-кумулянтні математичні моделі випадкових процесів і модифікований моментний критерій перевірки статистичних гіпотез, здійснено синтез



поліноміальних розв'язувальних правил для задачі виявлення постійного сигналу в умовах адитивної взаємодії з корельованими негаусовими завадами, що мають асиметричні, ексцесні або комбіновані (асиметрично-ексцесні) властивості.

Проведено порівняльний аналіз ефективності як нелінійних, так і лінійних розв'язувальних правил в умовах різних типів кореляційних функцій і параметрів негаусових завад. Показано, що використання нелінійної обробки та врахування в аналізі статистик вищих порядків, таких як коефіцієнти асиметрії та ексцесу, дозволяє суттєво підвищити точність виявлення сигналів у порівнянні з традиційними методами, які базуються на припущеннях про нормальний закон розподілу щільності ймовірності.

У роботі представлено синтез поліноміальних алгоритмів виявлення сигналів для степенів поліному  $s=1, 2, 3$ , а також здійснено детальний аналіз отриманих результатів, ілюстрований численними графічними представленнями. На основі цього аналізу сформульовано висновки, які дозволяють виявити ключові закономірності щодо зростання ефективності поліноміальної обробки сигналів у порівнянні з існуючими підходами.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи проведено комп'ютерне моделювання процесів виявлення сигналів в умовах впливу корельованих негаусових завад. Наведена архітектура програмного комплексу системи моделювання процедур виявлення сигналів при впливі різноманітних типів завад, а також представлено структурну схему системи виявлення постійного сигналу з використанням поліноміальних розв'язувальних правил.

Для проведення моделювання було запропоновано удосконалення методу генерації корельованих негаусових випадкових величин, який ґрунтується на використанні полігаусових багатовимірних моделей, що дозволяють не лише кількісно описувати рівень негаусовості досліджуваних процесів, але і враховувати їхню кореляційну структуру. Такий підхід забезпечив можливість комплексної оцінки впливу статистичних залежностей між випадковими величинами та формування висновків щодо ефективності обробки сигналів у складних завадових умовах.

Даний розділ роботи носить прикладний і експериментальний характер та підтверджує можливість практичної реалізації і ефективність запропонованих теоретичних підходів — зокрема, математичних моделей на основі моментно-кумулянтного опису і методів синтезу поліноміальних алгоритмів для виявлення сигналів на фоні корельованих негаусових завад. Проведене комп'ютерне моделювання продемонструвало високу результативність розроблених алгоритмів у контексті складних умов, що характеризуються наявністю статистично залежних негаусових завад.

**Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та опублікованих працях**

Отримані в дисертаційній роботі результати знайшли відображення у 12 наукових публікаціях, серед яких 3 статті опубліковано у фахових виданнях

України категорії «Б», 2 статті — в зарубіжних наукових виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, а також представлено 7 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, частина з яких також індексується у базі Scopus.

Вважаю, що рівень і кількість наукових публікацій Д.О. Смірнова відповідають встановленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за даною спеціальністю.

### **Відсутність порушення академічної доброчесності**

Дисертація містить результати власних досліджень здобувача. Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях не виявлено.

### **Зауваження та недоліки дисертації щодо її оформлення і змісту**

В якості зауважень до дисертаційної роботи слід вказати наступне.

1. В першому розділі дисертаційної роботи наводяться вирази (1.3-1.5) порівняння відношення правдоподібності з різними порогами. В роботі не достатньо обґрунтовано подальше застосування відповідного порогу при побудові розв'язувальних правил.
2. Для опису статистичних зв'язків вибірових значень використовується двовимірне моментно-кумулянтне представлення досліджуваних процесів. Не наводиться достатнього обґрунтування щодо вибору такого представлення.
3. При проведенні досліджень ефективності отриманих результатів показано, що збільшення степеня стохастичного полінома розв'язувальних правил дозволяє зменшити ймовірності помилок першого та другого роду при врахуванні параметрів негаусової завади. В роботі бажано надати рекомендації щодо вибору степені полінома розв'язувальних правил.
4. В дисертаційній роботі при проведенні експериментальних досліджень зміна параметрів кумулянтних коефіцієнтів відбувається згідно заданої області допустимих значень. Разом з тим не достатньо обґрунтовані вирази, які визначають такі області.
5. В четвертому розділі дисертаційної роботи в п.4.2. наведена реалізація стаціонарних корельованих негаусових процесів з визначеними характеристиками при застосуванні бігаусових моделей випадкових процесів. Разом з тим не проведені дослідження, як б демонстрували межі досяжності граничних теоретичних значень кумулянтних коефіцієнтів для бігаусової моделі.
6. У підрозділі 4.4 йдеться про можливість реалізації структурної схеми на FPGA та DSP. Чи проводилася оцінка апаратних ресурсів, необхідних для реалізації поліноміальних розв'язувальних правил зі ступенем  $s=2$  або  $s=3$ ?

На мою думку, незважаючи на вказані зауваження, представлена дисертаційна робота є важливим науковим дослідженням та заслуговує на позитивну оцінку.

### **Загальні висновки за дисертаційним дослідженням**

Дисертаційне дослідження здобувача СМІРНОВА Данііла Олексійовича на тему «Математичні моделі, методи та засоби виявлення постійного сигналу на фоні негаусових корельованих завад» є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені результати. Отримані наукові положення мають важливе значення для галузі знань 12 «Інформаційні технології», зокрема у напрямі розвитку та дослідження математичних і комп'ютерних моделей систем і процесів, а також формування алгоритмічних принципів та програмних засобів їх практичної реалізації.

Вважаю, що представлена до захисту дисертаційна робота за ступенем актуальності теми, основних наукових положень, їх новизни, повноти викладу в наукових публікаціях, висновків і рекомендацій, відсутності порушень академічної доброчесності цілком відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 із змінами, а її автор СМІРНОВ Данііл Олексійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 — «Комп'ютерні науки».

Рецензент:

декан факультету інформаційних  
технологій і систем, доцент кафедри  
комп'ютерних наук та системного аналізу  
Черкаського державного технологічного  
університету, к.т.н., доцент



**Анатолій ЧЕПИНОГА**

Підпис к.т.н., доцента ~~Анатолія~~ ЧЕПИНОГИ засвідчую:

Учений секретар  
Черкаського державного  
технологічного університету,  
к.т.н., доцент



**Ірина МИРОНЕЦЬ**