

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора
Федорчука Володимира Анатолійовича
на дисертаційну роботу **ЗОРІНА Олександра Сергійовича**
**«Моделі та методи адаптивного виявлення сигналів на фоні негаусових
завад в інформаційно-вимірювальних системах»**
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 15 - Автоматизація та приладобудування
за спеціальністю 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

На експертизу представлено дисертаційну роботу обсягом 204 ст., у тому числі 158 ст., основного тексту, яка містить 47 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел з 117 найменувань та 3-х додатків на 12 сторінках.

Дисертаційне дослідження Зоріна Олександра Сергійовича виконувалося в Черкаському державному технологічному університеті в межах науково-дослідних проєктів: «Моделі, методи та засоби сумісного виявлення сигналів та оцінювання їх параметрів на фоні негаусових завад» (державна реєстрація № 0122U201835) та «Методи адаптивного виявлення сигналів в умовах неповної визначеності негаусівських завад» (державна реєстрація № 0123U105373).

1. Ступінь актуальності обраної теми

Дисертаційна робота присвячена дослідженню моделей та методів адаптивного виявлення RZ-сигналів у каналах зв'язку інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Це зумовлено зростаючими вимогами до надійності передачі вимірювальної інформації від первинних перетворювачів до систем прийняття рішень. Канал зв'язку є критичною ланкою ІВС, де внаслідок впливу електромагнітних завад, комутаційних процесів та інших дестабілізуючих чинників формуються завади, статистичні характеристики яких суттєво відрізняються від гаусової моделі випадкового процесу. За таких умов традиційні методи обробки сигналів втрачають ефективність, що вимагає розробки нових математичних моделей та методів адаптивного виявлення сигналів, здатних враховувати негаусовий характер завадового середовища.

Дисертаційне дослідження присвячено вирішенню науково-технічної задачі підвищення ефективності функціонування каналів зв'язку ІВС шляхом впровадження моментно-кумулянтних моделей та синтезу адаптивних поліноміальних розв'язувальних правил. Запропонований підхід дає змогу динамічно налаштовувати параметри обробки RZ-сигналів на основі поточних оцінок асиметрії та ексцесу негаусової завади, що забезпечує високу завадостійкість навіть у складних завадових умовах.

Отже, робота Зоріна О. С., спрямована на вдосконалення процесів адаптивної обробки сигналів у каналах зв'язку ІВС на основі статистик вищих порядків, є актуальною і має вагоме значення для сучасних ІВС.

2. Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

У дисертаційній роботі Зоріна О. С. розглянута та розв'язана важлива науково-технічна задача підвищення ефективності функціонування каналів зв'язку ІВС при адаптивному виявленні RZ-сигналів на фоні негаусових завад. Це досягнуто через розробку моментно-кумулянтних моделей суміші сигналів і завад, адаптацію моментного критерію якості для багатоальтернативної перевірки статистичних гіпотез та синтез адаптивних поліноміальних розв'язувальних правил.

Зокрема автором отримано такі основні наукові результати:

1. Вперше розроблено математичні моделі адитивної суміші дискретних RZ-сигналів та негаусових асиметричних, ексцесних і асиметрично-ексцесних випадкових величин на основі моментно-кумулянтного представлення. На відміну від існуючих, ці моделі враховують інформативні параметри вищих порядків (асиметрію та ексцес), що забезпечує повноту статистичного опису завадового середовища без використання характеристичних функцій та функцій розподілу і створює теоретичну основу для синтезу нелінійних алгоритмів обробки RZ-сигналів.

2. Вперше розроблено методи синтезу лінійних та нелінійних поліноміальних розв'язувальних правил адаптивного виявлення сигналів на фоні негаусових завад, які базуються на використанні статистик вищих порядків і є оптимальними за адаптованим моментним критерієм якості. Це дозволяє динамічно налаштовувати вагові коефіцієнти алгоритмів на основі поточних оцінок параметрів завади, забезпечуючи підвищення завадостійкості каналів зв'язку ІВС.

3. Удосконалено моментний критерій якості перевірки статистичних гіпотез шляхом його адаптації для задач багатоальтернативного виявлення сигналів на основі використання моментів і кумулянтів вищих порядків. Це дозволило підвищити точність прийняття рішень при обробці багаторівневих сигналів (зокрема біполярних RZ-сигналів) у складних завадових умовах.

4. Дістали подальший розвиток методи статистичної адаптивної обробки сигналів у каналах зв'язку ІВС, що ґрунтуються на спільному використанні процесів оцінювання кумулянтних коефіцієнтів та поліноміального виявлення. Це забезпечує стабільність передачі метрологічних характеристик систем в умовах апріорної невизначеності щодо виду та параметрів закону розподілу завад.

Отримані автором наукові результати розв'язують актуальну науково-прикладну задачу та створюють основу для проектування нових засобів обробки сигналів в каналі зв'язку ІВС.

3. Практична цінність та значимість результатів роботи

Практична значимість одержаних автором результатів підтверджується зв'язком дисертаційних досліджень із науковими напрямками Черкаського державного технологічного університету.

Практична цінність дисертаційного дослідження Зоріна О.С. полягає у наступному:

1. Розроблено алгоритмічне забезпечення для систем адаптивної обробки біполярних RZ-сигналів у каналах зв'язку ІВС, що базується на поєднанні процесів сумісного оцінювання параметрів негаусових завад (математичного сподівання, дисперсії, асиметрії та ексцесу) та поліноміального виявлення. Це дозволяє забезпечити високу завадостійкість передачі даних без необхідності знання точного закону розподілу завад.

2. Створено програмний комплекс у середовищі Matlab/Simulink, який реалізує структурні схеми каналів зв'язку з формуванням адитивної суміші сигналів і негаусових завад різних типів. Програмні модулі дозволяють проводити обчислювальні експерименти, досліджувати ефективність нелінійних розв'язувальних правил та підтверджують доцільність використання статистик вищих порядків для підвищення точності виявлення.

3. Синтезовані поліноміальні розв'язувальні правила характеризуються простотою програмно-апаратної реалізації та високою обчислювальною ефективністю, що робить їх придатними для використання в автоматизованих системах контролю та моніторингу в реальному часі.

4. Результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри робототехнічних і телекомунікаційних систем та кібербезпеки Черкаського державного технологічного університету при викладанні дисциплін, пов'язаних із обробкою сигналів та комп'ютерним моделюванням.

Отримані результати забезпечують можливість проєктування інформаційно-вимірювальних систем із покращеними метрологічними характеристиками, здатних надійно функціонувати у складних завадових умовах.

4. Достовірність отриманих результатів

Головні наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Зоріна О.С. достатньою мірою обґрунтовані та базуються на глибокому аналізі сучасних вітчизняних і зарубіжних наукових праць у галузі статистичної обробки сигналів та інформаційно-вимірювальних систем.

Достовірність наукових результатів дисертаційної роботи підтверджується такими чинниками:

- алгоритми обробки суміші сигналів та негаусових завад ґрунтуються на методах теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії перевірки статистичних гіпотез та моментно-кумулянтного опису випадкових величин;
- достовірність запропонованих моделей та методів підтверджена шляхом проведення обчислювальних експериментів та імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Отримані характеристики ефективності (зокрема ROC-криві) повністю підтверджують достовірність запропонованих алгоритмів щодо підвищення завадостійкості при врахуванні статистичних характеристик негаусових завад;

– апробацією результатів: Основні положення дисертації пройшли широку апробацію на 15 міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. Основні наукові результати опубліковані у 21 науковій праці, включаючи статті у фахових виданнях України та публікації, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus.

5. Структура та зміст дисертаційного дослідження

Представлена дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Вступ містить обґрунтування актуальності роботи, об'єкт, предмет, мету та методи дослідження, наукову новину, практичне значення та відомості про апробацію результатів.

Перший розділ присвячений аналізу методів виявлення сигналів та оцінювання їх параметрів на фоні негаусових завад в ІВС. Розглянуто основні підходи до моделювання випадкових процесів, проаналізовано труднощі застосування класичних ймовірнісних критеріїв при роботі з асиметричними та ексцесними завадами. Обґрунтовано необхідність використання моментно-кумулянтного опису випадкових величин як альтернативи ймовірнісному розподілу, що дозволяє враховувати статистики вищих порядків.

Другий розділ присвячено розробці математичних моделей та методів сумісного оцінювання параметрів сигналів і негаусових завад. Запропоновано загальну структуру адаптивного виявлення, що включає в себе підсистеми оцінювання та прийняття рішень. Розроблено моментно-кумулянтні моделі адитивної суміші RZ-сигналів та негаусових випадкових величин. Обґрунтовано використання моментного критерію якості мінімуму верхньої границі ймовірностей помилок (критерій K_u). Проведено адаптацію моментного критерію якості для багатоальтернативної перевірки статистичних гіпотез, що дозволяє одночасно розрізняти кілька станів сигналу в складних завадових умовах.

Третій розділ містить синтез та аналіз поліноміальних алгоритмів виявлення RZ-сигналів на фоні асиметричних, ексцесних та асиметрично-ексцесних завад. Проведено синтез лінійних та нелінійних розв'язувальних правил. Показано, що врахування коефіцієнтів асиметрії та ексцесу підвищує кількість здобутої інформації про розрізнення гіпотез і знижує ймовірності помилок першого та другого роду. Проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованих нелінійних алгоритмів із класичними лінійними методами обробки. Представлено результати імітаційного моделювання та побудовано ROC-криві, які підтвердили теоретичні висновки щодо переваг поліноміальних алгоритмів.

Четвертий розділ присвячено розробці програмних засобів комп'ютерного моделювання процесів адаптивного виявлення сигналів в ІВС. Проведено практичну реалізацію синтезованих методів обробки сигналів у середовищі Matlab/Simulink. Проведено аналіз ефективності алгоритмів при

різних відношеннях сигнал/шум та параметрах негаусових випадкових процесів, що підтвердило ефективність синтезованих алгоритмів.

Висновки містять узагальнені результати дослідження, підтвердження виконання поставлених задач та окреслюють перспективи подальшого розвитку методів адаптивної обробки сигналів в ІВС.

6. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та опублікованих в роботах автора

Основні наукові результати дисертаційного дослідження Зоріна О. С. достатньою мірою відображені у 21 науковій публікації, що забезпечує повноту викладення основних положень роботи.

Публікації за темою дисертації включають:

1 статтю у провідному науковому фаховому виданні України категорії «А», що входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science;

3 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б»;

2 статті у закордонних періодичних виданнях, які індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus;

15 матеріалів доповідей та тез у збірниках міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій, з яких 3 проіндексовано в наукометричній базі Scopus. Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на 15 наукових конференціях, що демонструє високий рівень фахової підготовки автора та широке визнання отриманих результатів науковою спільнотою.

Повнота відображення результатів дисертаційного дослідження в опублікованих працях та їх кількість повністю відповідають вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та вимогам МОН України щодо дисертаційних робіт.

7. Відсутність порушення академічної доброчесності

Дисертація містить результати власних досліджень здобувача. Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях не виявлено. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело. Інші запозичення, виявлені в роботі, є загальнонавчаними і не є плагіатом.

8. Зауваження до дисертаційної роботи

В якості зауважень до дисертаційної роботи слід вказати наступне:

1. У дисертаційній роботі при синтезі поліноміальних алгоритмів виявлення сигналів передбачається наявність апріорної інформації про моментно-кумулянтні характеристики завади. Хоча в роботі запропоновано алгоритми сумісного оцінювання параметрів методом моментів, недостатньо детально розписано процедуру адаптації при зміні статистичних властивостей завадового середовища.

2. При синтезі розв'язувальних правил здобувачем обирається степінь полінома ($s = 1$ або $s = 2$). Проте в роботі недостатньо висвітлено питання граничної обчислювальної складності при спробі підвищення степеня полінома (наприклад, до $s = 3$ або $s = 4$) для задач багатоальтернативного виявлення, що може бути критичним для апаратної реалізації.

3. При побудові структурних схем адаптивної системи в середовищі Matlab/Simulink не наведена оцінка часових витрат на обчислення оцінок асиметрії та ексцесу в реальному масштабі часу, що є важливою характеристикою для високошвидкісних каналів зв'язку ІВС.

4. У роботі основна увага приділена біполярним дискретним RZ-сигналам. Бажано було б дослідити можливість застосування розроблених поліноміальних алгоритмів для інших типів імпульсних сигналів.

5. Автор порівнює ефективність поліноміальних розв'язувальних правил із класичними лінійними правилами. Було б доцільно розширити це порівняння, вказавши, наскільки зростають обчислювальні витрати при збільшенні степеня полінома розв'язувального правила.

6. У роботі всі дослідження проведені в середовищі Matlab/Simulink. Було б доцільно обґрунтувати, чому для реалізації алгоритмів не розглядалися інші пакети моделювання або мови програмування низького рівня, які часто використовуються для мікроконтролерів в ІВС.

Незважаючи на вказані зауваження, які не знижують загального позитивного враження від наукового дослідження, представлена дисертація Зоріна О. С. є завершеною науковою працею, та заслуговує на високу позитивну оцінку.

9. Загальні висновки за дисертаційним дослідженням

Дисертаційна робота **Зоріна Олександра Сергійовича** «Моделі та методи адаптивного виявлення сигналів на фоні негаусових завад в інформаційно-вимірювальних системах» є завершеною науково-дослідною працею, в якій містяться нові наукові положення, нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати проведених здобувачем досліджень. Робота має вагомe значення для розвитку методів математичного та комп'ютерного моделювання алгоритмів адаптивної обробки сигналів на фоні негаусових завад в каналі зв'язку ІВС.

Результати проведених здобувачем досліджень мають істотне значення для галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування», зокрема для підвищення ефективності функціонування каналів зв'язку інформаційно-вимірювальних системах шляхом впровадження моментно-кумулянтних моделей та нелінійних поліноміальних методів обробки сигналів.

Отже, дисертаційна робота за ступенем актуальності обраної теми, обґрунтованості основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що були сформульовані в роботі, їх наукової новизни, повноти викладу в наукових публікаціях, відсутності порушень академічної доброчесності цілком відповідає

всім 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 **Зорін Олександр Сергійович** заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 — «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

Офіційний опонент:

Професор кафедри комп'ютерних
наук Кам'янець-Подільського
національного університету
імені Івана Огієнка,
д. т. н., професор

Володимир ФЕДОРЧУК

