

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора, професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Політанського Руслана Леонідовича на дисертаційну роботу Воловика Андрія Юрійовича «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 - Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

### **Актуальність теми дисертації**

Традиційно авіація відіграє ключову роль у становленні світової економіки. На рівні з цим підвищуються і вимоги до її безпечності, яка повинна відповідати стандартам і рекомендованій практиці міжнародної організації цивільної авіації (ІСАО). Організація й керування повітряним рухом в умовах постійного зростання числа й типів повітряних судів вимагає постійного вдосконалення як організаційних так і технічних заходів щодо оптимальної організації польотів повітряних судів у підконтрольних зонах. В цьому сенсі аеродромна зона є найбільш складним етапом керування повітряним рухом. В основі безпечного й точного польоту по маршруту, у районі аеродрому, при зльоті й посадці лежить принцип комплексного використання всіх наявних, як наземних так і бортових, технічних засобів, а успішний розв'язок завдань керування повітряним рухом, при цьому, визначається їх технічними можливостями. Безпосередньо процес посадки повітряних судів, на сьогодні, залишається найбільш небезпечним і відповідальним етапом, що характеризується зміною режиму польоту, швидкоплинністю та психофізіологічним навантаженнями на екіпаж. Не зважаючи на присутність екстремальних умов та потенційну небезпеку експлуатації авіаційного обладнання, вимоги до рівня безпеки залишаються достатньо високими, а саме ймовірності льотної пригоди повинна бути не більшою за  $10^{-7}$ . Для авіаційних радіотехнічних засобів, одним з напрямків підвищення надійності, а отже і авіаційної безпеки, є впровадження новітніх систем функціональної діагностики. Традиційні методи підвищення функціональної надійності шляхом багатократного апаратного резервування та введення у радіонавігаційне обладнання систем вбудованого контролю, при цьому, не забезпечують бажаного ефекту. Окрім того, їх застосування супроводжуються підвищенням вартості обладнан-

ня, експлуатаційних витрат на технічне обслуговування, збільшенням ваги, габаритів тощо. Загально світові тенденції розвитку у цьому напрямку демонструють, що більш доцільним є використання методів модельно-орієнтованої концепції з аналітичною надлишковістю. Отримані таким шляхом спеціальні сигнали набувають інформаційної складової стосовно відповідних несправностей з можливістю подальшого їх виявлення, локалізації та ідентифікації. Можна стверджувати що, на даний час, існуючий рівень апаратного резервування авіаційно-технічних засобів та радіонавігаційного обладнання не дозволяє досягнути необхідного рівня безпеки без використання методів заснованих на інформаційно-аналітичній надлишковості.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності засобів функціональної діагностики радіотехнічних систем. Засобом досягнення мети є розробка та реалізація високоточних, оперативно-динамічних модельно-орієнтованих методів обробки інформаційних сигналів на системній основі з використанням сучасних ІТ-технологій. У поєднанні з комплексом додаткових заходів розроблені методи обробки сигналів уможливають досягнення регламентованих показників надійності, точності та стійкості радіонавігаційного обладнання посадкової системи до широкого класу можливих порушень працездатності. Отже, тема роботи є актуальною в умовах підвищених вимог до надійності функціонування окремих систем і модулів повітряних суден із пілотуванням та безпілотним управлінням.

### **Оцінка змісту та завершеності дисертації.**

Дисертація присвячена удосконаленню відомих методів функціональної діагностики та створенню нових за рахунок розробки та реалізації високоточних, оперативно динамічних модельно-орієнтованих методів обробки інформаційних сигналів.

Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, основної частини – шести розділів з висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел з 284 найменувань і 3 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 464 сторінках загального машинописного тексту, з них – 340 сторінки основного тексту, містить 91 рисунок і 10 таблиць. Додатки містять довідниковий матеріал, часткові результати моделювання, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список праць автора за темою дисертації.

Структура роботи по складу та послідовності розділів логічна та в цілому відповідає вимогам до докторських дисертацій. Викладені наукові положення, висновки та рекомендації в достатній мірі обґрунтовані та в більшості підтверджені експериментально.

**У вступі** обґрунтована актуальність наукової проблеми, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені об'єкт та предмет досліджень, відображені основні наукові результати, їх практичне значення. Підкреслено зв'язок з науковими програмами, творчий внесок автора та результати апробації.

**У першому розділі** в рамках поданої термінології виконана класифікація несправностей та сформульована проблема їх виявлення та локалізації у динамічних системах. Виконано огляд основних методів побудови модельно-орієнтованих схем функціональної діагностики, що використовують кількісну математичну модель. Виконано порівняльний аналіз їх якісних показників. На основі порівняльного аналізу сформульований перелік основних завдань для подальших досліджень.

**Другий розділ** присвячений методам синтезу пристроїв відновлення діагностичного типу повного порядку. Сформульовано дискретний варіант задачі синтезу функціонального пристрою відновлення. Значна увага приділена синтезу оптимальних відновників у рекурентній формі методом зважених найменших квадратів. Показано, що формування різницевого сигналу стійкого до сукупності фонових збурень, неминуче присутніх у реальній динамічній системі, являє собою суттєвий момент у задачах, пов'язаних з модельно-орієнтованими методами виявлення та локалізації несправностей. Запропонована структура пристрою відновлення діагностичного типу повного порядку з невизначеними входами, встановлені та доведені умови його існування.

**У третьому розділі** розглянуті питання проектування стохастичних пристроїв відновлення вектора стану динамічних змінних систем, що мають підвищену стійкість до несправностей у сенсорній підсистемі. Запропонована математична модель сенсорної підсистеми з невизначеним станом. Наведені факти на користь її змістовності та універсальності. Показано, що залишаючись у рамках баєсового підходу та гауссово-марковських моделей шляхом уведення поняття псевдобаєсової оцінки можна отримувати за рахунок втрати строгої оптимальності практично прийнятний варіант реалізації пристрою відновлення, стійкого до несправностей у каналі спостережень. На основі розробленого наукового підходу та скорегованої моделі каналу спостережень синтезовано низку квазіоптимальних пристроїв відновлення з різними ступенями захисту від аномальних похибок в залежності від кількості та якості доступної апріорної інформації. Запропоновано метод подолання апріорної невизначеності щодо ймовірності появи аномальних похибок.

**Четвертий розділ** пов'язаний з випадками коли несправності з'являються час від часу епізодично і настільки рідко, що статистичні дані про частоту їх появи відсутні. Розглянуто декілька можливих шляхів вирішення цієї проблеми, побудованих на принципах підвищення чутливості фільтра Калмана до рапто-

вих змін з використанням компенсаційних схем. Наприклад з використанням елементів параметричної або (та) структурної адаптації системи у режимі реального часу, обмеження знизу величини матричного коефіцієнта передачі, коваріаційної матриці похибок фільтрації, або тривалості пам'яті фільтра шляхом уведення двошкарпової схеми фільтрації.

Окремо було проведено дослідження низки робіт, що використовують ідею декомпозиції розширеного фільтра Калмана за методом Фрідланда, спеціалізованих фільтрів, чутливих до несправностей та модифікованих стохастичних відновників О'Рейлі–Луенбергера, розв'язаних від невизначених входів. Зокрема, у підрозділі 4.3 автором доведено, що декомпозиція схеми фільтрації за методом Фрідланда є лише квазіоптимальною, а умова її локальної оптимальності полягає у відсутності стохастичної складової у моделі динаміки несправності.

У підрозділі 4.4 розглянута задача діагностики несправностей у підсистемах регулятора на основі застосування системи виявляючих фільтрів у припущенні, що статистичні дані про частоту появи несправностей відсутні, виключаються випадки одночасної появи двох і більше несправностей.

У підрозділі 4.5 запропонований альтернативний варіант побудови фільтра Калмана з невизначеним входом, у якому на відміну від відомих результатів метод найменших квадратів не застосовується. Синтез фільтра виконано на основі модифікованого означення функціонального відновника О'Рейлі, адаптованого до стохастичної постановки задачі. Відповідно до доказаних теорем сформовані умови, за яких існує розв'язок задачі декомпозиції та запропонована методика проектування оптимального стохастичного відновника з невизначеними входами.

У **п'ятому розділі** розглянута низка задач, поєднаних спільною метою – сукупного оцінювання станів лінійних стохастичних систем та супутніх несправностей за наявності збурень, структура яких вважається невизначеною. У підрозділі 5.2 використання геометричного підходу дозволило виконати синтез фільтра, спроможного виявляти несправності та виконувати їх локалізацію за умови відсутності супутніх збурень. Підрозділи 5.3–5.4 присвячені методам синтезу фільтрів для роздільного оцінювання несправностей та вектора стану системи, що засновані на концепції Кітанідіса. У підрозділах 5.5 та 5.6 розглянуті методи синтезу розширених локально-оптимальних фільтрів для роздільного оцінювання вектора несправностей та стану системи за умови використання математичних моделей дестабілізуючих факторів. Ці фільтри опираються на концепцію Фрідланда. Характерною ознакою синтезованих фільтрів розширеного типу є певний симбіоз розглянутих концепцій. Підсумки результатів досліджень з цього напрямку представлені у підрозділі 5.7.

У шостому розділі роботи наведені основні результати дисертаційного дослідження, що присвячені практичним аспектам теорії функціональних відновників діагностичного типу на прикладі авіаційної системи посадки сантиметрового діапазону. Виконано аналіз архітектури посадкової системи та її тактико-технічних характеристик. Наведені довідкові дані щодо формату сигналу, способів розгортання на місцевості та методів первинних вимірювань кутових координат на боту ПС. Розроблена номінальна математична модель динаміки зміни кута місця повітряного судна у процесі виконання посадкового маневру.

В рамках байєсової концепції на основі доопрацьованих моделей виконано порівняльне дослідження якісних показників оптимальних, квазіоптимальних та адаптивних фільтрів з різним ступенем захисту від аномальних похибок у кутомірному каналі в залежності від доступної апріорної інформації щодо властивостей параметричної змінної за критерієм «точність – достовірність – обчислювальні витрати». На основі розробленої номінальної моделі повітряного судна запропоновані два типи моделей динамічних систем за наявності несправностей та збурень. У рамках моделей цього класу були досліджені характеристики точності оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна на етапі вирівнювання для трьох базових структур – фільтрів, що входять до складу пристроїв обробки сигналів з підвищеною стійкістю до несправностей та супутніх збурень, а саме стандартного фільтра Калмана, модифікованого фільтра Кітанідіса та модифікованого фільтра Фрідланда. Заключна частина шостого розділу присвячена результатам моделювання більш складної та практично значимої задачі функціональної діагностики – роздільному оцінюванню як несправностей, так і вектора стану системи за умови сукупної дії невизначених несправностей та збурень, як у каналі спостережень, так і у підсистемі «об’єкт–регулятор» з використанням розширених математичних моделей, віднесених автором до моделей другого типу. Дослідженню підлягали характеристики точності оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна для двох різновидів робастних структур, побудованих на основі модифікованих фільтрів Фрідланда та Кітанідіса.

У висновках сформульовано основні результати проведених досліджень.

#### **Наукова новизна дисертаційних досліджень.**

В переставленій дисертаційній роботі отримали подальшого розвитку теоретичні засади побудови математичних моделей динамічних систем з супутніми несправностями та методи синтезу пристроїв обробки інформативних сигналів у радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю. Відповідно до мети дисертаційного дослідження одержані такі нові наукові результати:

Вперше:

– запропонована науково обґрунтована концепція синтезу пристроїв виявлення несправностей, їх локалізації та ідентифікації у лінійних динамічних системах, згідно якої переважна більшість прикладних задач такого типу може бути успішно розв'язаною у рамках теорій модельно-орієнтованих відновників О'Рейлі–Луенбергера та фільтра Калмана, що опираються на математичні моделі кількісного типу.

– запропонований науково обґрунтований підхід, згідно якого основну увагу слід зосередити не стільки на добре досліджених фільтрах Калмана та пристроях відновлення О'Рейлі–Луенбергера, скільки на їх реконструкції у відповідності до вельми специфічних задач функціональної діагностики лінійних динамічних систем реального часу, що дозволяє: з єдиних системних позицій розглядати, як детермінований так і стохастичний варіанти постановки задачі виявлення несправностей, їх локалізацію та ідентифікацію; досягати високої оперативності без потреби встановлення додаткового обладнання, що виключає появу додаткових джерел несправностей; використовувати всебічно розвинений апарат матричної алгебри, доповнений високо ефективними та загально доступними пакетами прикладних програм.

– запропонована строго аргументована математична модель сенсорної підсистеми, яка на відміну від відомих, здатна зберігати працездатність у широкому діапазоні співвідношень сигнал/шум у стандартному фільтрі Калмана, та не виключає появу спостережень різної точності включно з аномальними.

– вперше запропонована науково обґрунтована методологія синтезу умовно–оптимального розщепленого фільтра Фрідланда, виходи якого еквівалентні виходам розширеного фільтра Калмана за умови дотримання певних обмежень. Зазначена методологія ґрунтується на приведенні коваріаційних матриць похибок фільтрації та екстраполяції розширеного фільтра Калмана до діагонального виду шляхом застосування двох матричних ортогональних перетворень спеціального типу. Приведена методологія відрізняється відмовою від принципу автономності складових розщепленого фільтра та охопленню їх системою перехресних зв'язків.

– у рамках розробленої методології, запропоновано метод синтезу локально – оптимального трьох каскадного фільтра розщепленого типу, який дозволяє враховувати появу несправностей та збурень не тільки у підсистемі «об'єкт-регулятор», а і у підсистемі спостережень, що забезпечує можливість одночасно і роздільно оцінювати як вектор стану системи, так і вектори присутніх у системі несправностей та збурень.

– у рамках розробленої методології, запропоновано метод синтезу системи розщеплених фільтрів робастного типу, який базується на припущенні, пов-

ної відсутності ймовірнісного опису системних несправностей і збурень та їх представленні довільними функціями часу, що дозволило подолати такі перепони на шляху практичної реалізації розробленого алгоритму, як надмірна складність та великий об'єм необхідної апріорної інформації. Запропонований метод передбачає заміну корегувальних входів у екстраполяторах фільтрів та застосуванням у процедурах обчислення коваріаційних матриць похибок оцінювання векторів несправностей та збурень апарату псевдоінверсій Мура–Пенроуза, оскільки за рахунок уведених структурних спрощень коваріаційні матриці відповідних різницевих сигналів стали виродженими.

– запропоновано метод отримання сукупно ефективних оцінок вектору стану та несправностей за наявності збурень з невизначеною структурою за критерієм, який гарантує відсутність зсуву у похибках оцінювання та мінімум сліду їх коваріаційних матриць, при цьому передбачається, що несправності одночасно впливають як на стан системи, так і на вихідні змінні, а збурення лише на змінні стану та не виключаються випадки, коли матриця розподілу несправностей може бути матрицею довільного рангу.

Подальшого розвитку набули:

– основи теорії синтезу пристроїв відновлення вектору стану лінійних динамічних систем, інваріантних щодо дії несправностей у каналі спостережень, що передбачає можливість отримання, у рамках байєсової методології, оптимального пристрою відновлення повного порядку у вигляді паралельно діючої структури з  $N$  модельно-умовних фільтрів Калмана, У разі апріорної невизначеності щодо ймовірностей появи аномальних похибок у каналі спостережень запропонований адаптивний варіант побудови пристрою оцінювання псевдобайєсового типу;

– методи синтезу квазіоптимальних фільтрів робастного типу, у яких ступінь захищеності від дії аномальних похибок залежить від кількості та якості доступної апріорної інформації, а реалізація відбувається шляхом структурних або(та) алгоритмічних спрощень;

– метод виявлення множинних несправностей у підсистемах об'єкта контролю та їх роздільного оцінювання у рамках геометричного підходу, де запроваджена процедура примусової класифікації за допомогою спеціально утвореного індексу виявлення несправностей, функціонально зв'язаного з сигнатурою несправностей та розщепленням фільтраційного процесу на рівні різницевих сигналів з використанням двох апріорно заданих послідовностей, результатом чого є утворення модифікованого фільтра Калмана, який одночасно оцінює вектор стану системи, вектор прогнозованих на крок уперед спостережень та розмір виявлених несправностей;



– метод сукупного виявлення та ідентифікації раптових змін у окремих складових вектора стану лінійної дискретної системи, у якому невідомими величинами є час появи несправності та її інтенсивність. До складу синтезованої структури входять система первинної обробки, що містить фільтр Калмана налаштований на режим роботи без несправностей та система вторинної обробки зі схемою виявлення несправностей на основі статистичного тесту узагальненого відношення правдоподібності, який використовує оцінки невідомих параметрів за критерієм максимуму правдоподібності.

Запропоновано:

– альтернативний метод виводу рівнянь для фільтра Калмана з статистично-невизначеними входами, який на відміну від відомих методів не опирається на теорему про ортогональну проекцію, а базується на означенні функціонального відновника у формі О'Рейлі – Луенбергера, що дає можливість відносно просто контролювати збіжність процесу фільтрації та його оптимальність.

**Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження.**

Основні, практично значимі, результати дисертаційної роботи отримані на базі проведених теоретичних та експериментальних досліджень. Вони одержані за рахунок розвитку методології синтезу та реалізації високоточних динамічно оперативних модельно-орієнтованих методів обробки сигналів на системній основі з використанням сучасних ІТ- технологій і спрямовані на підвищення ефективності засобів функціонального захисту радіотехнічних пристроїв з заданими показниками надійності, точності та стійкості до широкого класу порушень працездатності радіоелектронного обладнання посадкової системи сантиметрового діапазону. У межах запропонованого наукового підходу з урахуванням особливостей розроблених методів, моделей, пристроїв та реалізованих алгоритмів оцінювання отримані наступні практично значимі результати:

– запропоновано спосіб розгортання кутомірного обладнання на місцевості, що не погіршує тактико-технічні характеристики посадкової системи і в той же час сприяє майже двократному розвантаженню диспетчерської служби аеропорту від надлишкової інформації, що висвітлюється на екранах індикаторних пристроїв. Це дозволяє уникати грубих помилок за рахунок людського фактору та підвищує оперативність реагування обслуговуючого персоналу на випадок появи нештатних ситуацій. Новизна запропонованого способу захищена патентом України.

– на основі доопрацьованої математичної моделі динаміки повітряного судна розроблений пакет програм для статистичного моделювання, який дозволяє



виконувати порівняльний аналіз синтезованих пристроїв оцінювання за критерієм точність-достовірність-обчислювальна ефективність.

– для ділянки планування розроблено оптимальний пристрій оцінювання повного порядку з підвищеним ступенем захисту від аномальних похибок у каналі спостережень. Виграш у точності оцінювання висоти порівняно з стандартним фільтром Калмана складає близько двох порядків у перехідному режимі і до 10–25 разів в усталеному.

– з метою подолання апріорної невизначеності щодо ймовірностей появу аномальних похибок у каналі спостережень запропонована адаптивна схема формування оцінок висоти, показники точності якої, по закінченні фази самонавчання, майже співпадають з точністю оптимальної процедури. Визначено, що практична реалізація адаптивної схеми оцінювання потребує значних обчислювальних ресурсів.

– розроблено робастний фільтр структурно-укороченого типу. По відношенню до фільтра Калмана діапазон виграшу у точності у перехідному режимі сягає від 20 до 70 разів, а в усталеному режимі – до 20 разів.

– розроблено алгоритмічно спрощений фільтр підвищеної швидкодії з підвищеним ступенем захисту від аномальних похибок у каналі спостереження, де процедура обчислень апостеріорної ймовірності замінена селекторною схемою. Найбільш раціональний варіант забезпечує показники точності майже у 10-15 разів кращі за показники стандартного фільтра Калмана.

– запропоновано робастний пристрій оцінювання лінійного типу, який надає мінімальні можливості захисту від впливу аномалій лише у тій частині фільтраційного процесу, яка узгоджена з наявними апріорними даними. Даний фільтр, у кращому випадку, може забезпечити виграш у точності порівняно з фільтром Калмана у межах від 2 до 2,5 разів за винятком перехідного режиму.

– доопрацьована номінальна модель динаміки 4-го порядку, яка апроксимує короткоперіодичну складову поздовжнього руху ПС на завершальному етапі посадкового маневру – вирівнюванні, таким чином, щоб усі змінні вектора стану допускали можливість безпосереднього спостереження.

– у рамках доопрацьованих моделей та розроблених методів на етапі вирівнювання ПС синтезовано модифікований фільтр Калмана з невизначеними входами та модифікований локально-оптимальний фільтр Фрідланда. Дослідження їх властивостей подано на фоні порівняння з результатами, отриманими від стандартного фільтра Калмана.

– в межах розроблених методів з метою подолання відсутності апріорної інформації щодо супутніх збурень та несправностей запропоновано два різновиди робастних пристроїв оцінювання, заснованих на концепціях Фрідланда та Кітанідіса. Уведення таких пристроїв дозволить роздільно оцінювати несправ-

ності та складові вектора стану у вигляді висоти ПС, кута тангажу та швидкості їх зміни для випадку сукупної дії несправностей та збурень, як у каналі спостережень, так і у підсистемі «об'єкт–регулятор».

Наукові та практичні результати проведених досліджень використані:

– у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету, а також у держбюджетних науково-дослідних роботах з 2014 по 2022 рік;

– для задач діагностики технічного стану та обробки даних результатів контрольних вимірювань технічних параметрів інструментальної системи посадки та комплексної радіонавігаційної системи VOR/DME, що знаходяться на об'єктах ДП «Украерорух», «Аеропорт Вінниця»;

– в задачах діагностики технічного стану радіоелектронних пристроїв, авіаційних контрольно-вимірювальних приладів та їх відновлювального ремонту – Відділ метрологічного забезпечення авіації об'єднаного центру метрологічного забезпечення Збройних Сил України;

– у напрямках технічної експлуатації радіолокаційних та радіонавігаційних систем ближньої навігації – Державне підприємство «Новатор».

#### **Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі.**

У процесі виконання поставлених задач опис динамічних процесів (систем) здійснювався у термінах простору станів з використанням елементів векторно-матричної алгебри, основних положень теорії статистичних рішень, базових понять теорії функціональних відновників О'Рейлі та Луенбергера, теорії оптимальної дискретної фільтрації за Калманом. У разі апріорної невизначеності щодо структури несправностей та супутніх збурень оптимізація процесу оцінювання виконувалася методом зважених найменших квадратів або з використанням елементів варіаційного числення, зокрема, методу векторних множників Лагранжа. У експериментальній частині були використані аналітичні можливості напівнатурного та статистичного моделювання за методом Монте-Карло.

#### **Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри інфокомунікаційних систем і технологій та кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету, в межах низки держбюджетних науково-дослідних тем: 45-Д-361 «Розробка інформаційних пристроїв і засобів оцінювання джитеру на базі принципів нечіткого іммітанса та цифрового оброблення сигналів» (2014-2015 р.р.), №0114U003463; 45-Д-377 «Розробка методів і пристроїв первинного

цифрового оброблення високочастотних сигналів для систем радіоелектронної боротьби» (2016-2017р.), №0116U004710; 32-Д-386 «Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах». (2017-2018р.р.), №0117U000573; 45-Д-396 «Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу» (2019-2021р.р.), № 0119U000296; 32-Д-395 «Розроблення та дослідження радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних приладів фізичних величин для військових та цивільних об'єктів», (2019-2021р.). № 0119U000895; 32-Д-400 «Методи та пристрої формування й оброблення хаотичних сигналів, контролю доступу та позиціонування у робототехнічних та інфокомунікаційних системах» (2021-2022р.). № 0121U109722.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності нових наукових досліджень, висновків та рекомендацій.**

Наукові положення, методи, висновки і практичні результати отримані в ході проведення дисертаційного дослідження є обґрунтованими та достовірними. Це забезпечується використанням теоретичних постулатів векторно-матричної алгебри, основних положень теорії статистичних рішень, використанням методів зважених найменших квадратів або елементів варіаційного числення. Методи досліджень мають за основу наукові положення базових понять теорії функціональних відновників О'Рейлі та Луенбергера та теорії оптимальної дискретної фільтрації за Калманом. Ці фундаментальні напрямки широко апробовані та достатньо висвітлені у літературі. Обґрунтованість отриманих результатів дисертації також підтверджується доведенням їх до конкретних методів та алгоритмів, які можуть бути використані або вже використовуються у прикладних модельно-орієнтованих системах діагностики радіотехнічних систем з підвищеним функціональним захистом від несправностей.

Оцінка ефективності розроблених методів виявлення, локалізації та ідентифікації несправностей та контроль коректності системи припущень здійснювалися у процесі статистичного моделювання за методом Монте-Карло, в умовах максимально наближених до реальних, шляхом використання апріорних даних отриманих за допомогою напівнатурного експерименту. Занотовані дані є повними та детальними, а їх результати узгоджуються з теоретичними очікуваннями.

### **Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи.**

Розроблені моделі й методи дослідження, наукові положення, висновки й практичні рекомендації з достатньою повнотою наведені в роботах, що опублі-

ковані за темою дисертації. Результати роботи пройшли необхідну апробацію на наукових конференціях.

Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 52 наукових працях, з яких 10 одноосібних. Серед опублікованих праць 2 монографії; 6 статей у журналах що індексуються в наукометричних базах: Scopus, Web of Science, серед яких 1 у періодичному виданні з Q2, 3 у закордонних періодичних виданнях, 1 стаття у фаховому виданні України категорії А, що входить до наукометричних баз Web of Science, 1 стаття у фаховому виданні України категорії В, що входить до наукометричних баз Scopus; 13 – статей у наукових фахових виданнях України категорії Б; 26 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, а також 5 патентів України на корисну модель.

Результати дисертаційної роботи повністю викладені в опублікованих наукових працях, а аналіз публікацій, які висвітлені у дисертації, з питань внеску автора показав, що внесок Воловика А.Ю. є вирішальним.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам.**

Матеріали дисертаційної роботи Воловика А.Ю. «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» систематизовані, коректно оформлені, викладені в послідовній, логічній формі. Структура дисертації, мова та стиль викладення є на належному науково-технічному рівні і відповідають вимогам, що висуваються до докторських дисертацій відповідно до Наказу МОН № 40 від 12.01.2017 р. (із змінами, внесеними згідно з Наказом МОН № 759 від 31.05.2019 р.)

Текст і систематизована методика викладу дисертації є фаховим та одночасно доступним для широкого кола дослідників в галузі проектування радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій з коректними та зваженими формулюваннями та узагальненнями, що свідчить про високу кваліфікацію автора.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.12.13 - Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій, за якою вона подана до захисту, а також профілю спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10.

Рукопис дисертації відповідає існуючим вимогам стосовно викладення науково-технічної інформації з використанням загальноприйнятої термінології.

Автореферат відображує основні результати й висновки роботи, які оформлені відповідно до діючих вимог.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Розділ 1 перевантажений детальним описом подробиць які завищують його обсяг. Наприклад, у підрозділі 1.1 можливо було обмежитись означенням 1.4 без детального пояснення різниці між відмовами та збоєм та інше. Деяку

частину означень, без втрати смислової послідовності, можна було б перенести в додаток А. Текст підрозділу 1.3 за змістом співпадає з пунктами 1 – 10 підрозділу 1.14 (стор. 108), його можна було не приводити.

2. Протягом проведення дослідження автор обмежує простір наукового пошуку лінійними або лінеаризованими типами моделей динамічних систем. Якими ствердженнями обґрунтований такий вибір? Пояснення у підрозділі 1.7 стосовного цього відсутні.

3. Оскільки у дисертаційній роботі основна увага зосереджена навколо дискретних динамічних систем стає не зрозумілим чому при розробці теоретичних засад модельно-орієнтованих діагностичних відновників у другому розділі деякі теоретичні питання (підрозділи 2.1, 2.2) детально розглядаються на основі систем відновлення безперервного часу.

4. У підрозділі 2.6.3 (стор. 148) пункт 1 наведено, що до складу оптимального пристрою відновлення входять дві складові частини – пристрій оцінювання та ідентифікатор початкового стану. В структурі пристрою відновлення, що наведена на рис. 2.4 він не представлений. Не зовсім зрозуміло яку нову якість отримує пристрій оцінювання (фільтр Калмана) у поєднання з ідентифікатором початкового стану.

5. Підрозділ 3.2.1, де розглядаються питання стосовно векторних операції з параметрами нормального закону розподілу ймовірностей доцільно було представити у другому розділі роботи, оскільки це теоретичне питання допоміжного характеру і не відноситься до наукових здобутків автора.

6. Підрозділи 3.6, 3.7. присвячені розробці методів синтезу робастних пристроїв оцінювання. Розглянуті методи дозволили синтезувати низку фільтрів, кожен з яких має свої особливості. Перенасиченість математичними формулами ускладнює розуміння сутності запропонованих методів. На мою думку для більшої наглядності, при синтезі моделей робастних дискретних фільтрів, потрібно було представити графічно їх схематичні образи.

7. У вступній частині, з посиланням на відповідні джерела, автором задекларовано, що оптимальне відмовостійке керування складається з двох етапів – формування оцінки стану об'єкту контролю в умовах присутності несправностей і етапу формування сигналу керування здатного нейтралізувати вплив несправностей. Однак питання компенсації впливу несправностей в межах роботи залишилось майже без уваги.

8. Розроблені в роботі методи і засоби функціональної діагностики, що орієнтовані на використання кількісних математичних моделей, у кінцевому випадку мають за мету виявлення та ідентифікацію несправностей різноманітних типів. І в одному і в другому випадках, для їх виявлення, сформований інформаційний сигнал порівнюється з деяким пороговим рівнем. Посилання на

даний алгоритм неодноразово зустрічається у матеріалах роботи (стор. 90, 91, 166, 167, 371 ). Не зважаючи на практичну орієнтованість представленої роботи, питання прийняття рішення і формування цієї граничної величини не розглядаються.

9. Автором запропонована науково обґрунтована концепція синтезу пристроїв виявлення несправностей, їх локалізації та ідентифікації у лінійних динамічних системах. В подальшому, на її основі сформований науковий підхід який дозволив розробити набір методів і синтезувати ряд пристроїв. Відомо, що у процесі наукового пошуку прийняті початкові концептуальні положення перевіряються, розвиваються, коригуються або відкидаються. В загальних висновках по роботі інформація такого характеру відсутня.

Проте, наведені зауваження не зменшують наукового рівня та цінності дисертаційної роботи в цілому. Роботу написано переконливо.

### **Висновки**

1. Дисертаційна робота Воловика Андрія Юрійовича, яка виконана на тему «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» є завершеною науковою працею, у якій на основі розробленої концепції, в рамках запропонованого наукового підходу розв'язано актуальну науково-прикладну проблему, що полягає у необхідності розроблення на системній основі нових та вдосконаленні відомих методів, пристроїв та алгоритмів генерування та обробки спеціальних сигналів–діагностичних ознак, які у поєднанні з використанням сучасних інтелектуальних технологій здатні забезпечити регламентовані показники точності, надійності та ефективності радіонавігаційного обладнання посадкових систем за умови дії широкого спектру несправностей.

Робота цілком відповідає вимогам «Паспорту» спеціальності 05.12.13 — радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

2. Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення і нові науково обґрунтовані результати. Основні положення дисертаційної роботи повністю відображені у публікаціях здобувача.

3. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертації.

4. Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними постановами Кабінету міністрів України № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016, № 943 від 20.11.2019, № 607 від 15.07.2020) які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор – Воловик Андрій Юрійович заслу-

говує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 — радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри радіотехніки та  
інформаційної безпеки  
Чернівецького національного  
університету імені Юрія Федьковича



Руслан ПОЛІТАНСЬКИЙ

Лідпис Лілітаницько Р. А. засвідчую  
Начальник відділу кадрів Чернівецького  
національного університету  
імені Юрія Федьковича  
Лілітаницько Р. А.  
24 " 05 2024 р

