

Голові спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10  
Національного університету  
«Львівська політехніка»

79013, м.Львів, вул. С.Бандери, 12

## ВІДГУК

офіційного опонента 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 дисертаційної роботи.**

На цей час питання забезпечення належного рівня надійності та гарантування заданого ступеню безпеки експлуатації технологічно-складних систем різного призначення є нагальною і актуальною проблемою. Авіаційна безпека визначається здатністю авіаційно-транспортної системи здійснювати повітряні перевезення без загрози для життя і здоров'я людей, тому питанням безаварійної експлуатації приділяється значна увага. Посадка цивільних або військових повітряних суден являє собою найбільш складний етап польоту, що вимагає чіткої взаємодії багатьох авіаційних структурних елементів, зокрема і безаварійної роботи інструментальних посадкових систем. Традиційні методи апаратного резервування авіаційно-технічних засобів, радіотехнічного та радіонавігаційного обладнання та існуючі на їх основі системи діагностики не дозволяють досягти необхідного рівня надійності, а відповідно і безаварійності експлуатації. Тому виникає необхідність в розробленні нових та вдосконаленні відомих методів, пристроїв та алгоритмів функціональної діагностики, які у поєднанні з використанням сучасних інформаційних технологій здатні забезпечити регламентовані показники точності, надійності та ефективності радіонавігаційного обладнання посадкових систем за умови дії широкого спектру несправностей.

Дисертаційна робота виконана у відповідності до планів наукової тематики кафедри інфокомунікаційних систем і технологій та кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету, зокрема, державної бюджетної тематики «Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу» (2019-

2021р.р., номер державної реєстрації 0117U000573), «Розроблення та дослідження радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних приладів фізичних величин для військових та цивільних об'єктів» (2019-2021р.р, номер державної реєстрації 0119U000296).

Отримані в дисертаційній роботі результати у вигляді математичних моделей динамічних систем з супутніми несправностями та методи синтезу пристроїв обробки інформативних сигналів у радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю дозволяють покращити техніко-економічні та екологічні показники посадкових систем, уникати в подальшому катастрофічних наслідків у разі появи екстремальних умов експлуатації та зменшити виробничі й фінансові витрати при цьому.

Таким чином, актуальність проблеми, сформульованої у дисертаційній роботі здобувачем не підлягає сумніву.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

В результаті дисертаційного дослідження автором отримані нові наукові результати, а саме:

- вперше запропонована науково обґрунтована концепція синтезу пристроїв виявлення несправностей, їх локалізації та ідентифікації у лінійних 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, при цьому інші відомі модельно-орієнтовані методи є окремими випадками цієї концепції, а існуючі альтернативні методи, як правило, не використовують вищезазначені моделі у якості джерела додаткової апріорної інформації;

- вперше запропонований науковий підхід, згідно якого основну увагу слід зосередити не стільки на фільтрах Калмана та пристроях відновлення О'Рейлі–Луенбергера, скільки на їх реконструкції у відповідності до специфічних задач функціональної діагностики лінійних систем реального часу;

- вперше запропонована 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.

- подальшого розвитку набули основи теорії синтезу пристроїв відновлення вектору стану лінійних динамічних систем, інваріантних до дії несправностей у каналі спостережень, що передбачає можливість отримання, у рамках байєсової методології, оптимального пристрою відновлення повного порядку у вигляді банку модельно-умовних ФК, використання якого дозволяє, на відміну



від відомого стандартного ФК, більш ніж на порядок послаблювати вплив аномальних похибок на результуючу точність оцінювання за умови помірнього зростання обчислювальних витрат;

- подальшого розвитку дістали 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 та (або) алгоритмічних спрощень.

У рамках розробленого наукового підходу запропоновано: метод синтезу робастного фільтра, у якому завдяки структурним спрощенням з'являється можливість у випадку появи несправностей у сенсорній підсистемі переводити його у режим екстраполяції, не використовуючи при цьому малодостовірні результати спостережень; метод синтезу робастного фільтра підвищеної швидкості; метод синтезу лінійного робастного пристрою оцінювання.

- 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 до діагонального виду шляхом застосування двох матричних ортогональних перетворень спеціального типу;

- у рамках розробленої методології, запропоновано метод синтезу локально-оптимального трьохкаскадного фільтра розщепленого типу, який на відміну від відомих, 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;

- вперше запропоновано метод синтезу системи розщеплених фільтрів робастного типу, який базується на припущенні повної 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 для роздільного оцінювання векторів стану та несправностей підсумковими оцінками, отриманими з попереднього обчислювального циклу та застосуванням у процедурах обчислення коваріаційних матриць похибок оцінювання векторів несправностей та збурень апарату псевдо інверсій Мура-Пенроуза;

- вперше 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, де 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 набув метод виявлення множинних несправностей у підсистемах об'єкта контролю та їх роздільного оцінювання у рамках геометричного підходу, в якому запроваджена процедура примусової класифікації за допомогою зв'язаного з сигнатурою несправностей спеціально утвореного індексу виявлення несправностей та розщепленням фільтраційного процесу на рівні різницевого сигналу 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;

- подальшого розвитку набув 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 із 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.

**Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень.** Обґрунтованість наукових положень і висновків роботи підтверджується коректністю постановки завдань, правильно обраними методами їх вирішення, співставлення одержаних результатів із результатами, опублікованими в наукових працях авторів провідних видань.

Основні методи теоретичних досліджень, що застосовувалися в дисертаційній роботі, мають за основу наукові положення базових понять теорії функціональних відновників та теорії оптимальної дискретної фільтрації і являють собою фундаментальні напрямки, що широко апробовані та достатньо висвітлені у літературі. Достовірність основних теоретичних положень і висновків



підтверджена задовільною збіжністю з результатами напівнатурного експерименту, а коректність системи припущень контролювалась у процесі статистичного моделювання за методом Монте-Карло.

Отримані результати є повними та детальними та узгоджуються з теоретичними очікуваннями.

Достовірність 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 змісту та завершеності дисертації.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано основну мету та задачі роботи, що розв'язувалися для її досягнення, показано наукове і практичне значення отриманих результатів, приведені наукова новизна, зв'язок з науковими програмами, планами та виконаними держбюджетними темами, зазначено особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів досліджень, впровадження та наукові публікації за темою дисертаційних досліджень.

У **першому** розділі дисертації викладені основні принципи побудови модельно-орієнтованих систем функціональної діагностики.

Проблема виявлення та локалізації несправностей сформульована у найбільш загальному випадку на основі уведених означень та математичних моделей несправностей у динамічних системах.

Визначено основне джерело діагностичної інформації яким є залишковий різницевий сигнал. Показано, що різноманітні системи функціональної діагностики можуть бути реалізованими шляхом відповідної обробки залишкового різницевого сигналу. Представлена узагальнена схема формувача (генератора) залишкового різницевого сигналу, з якої усі інші формати різницевого сигналу випливають, як окремі випадки. Розглянуті методи розв'язки різницевого сигналу від таких факторів, як системні збурень, похибки моделювання, штучне заниження порядку моделі, вплив перешкод, шумів та тощо. Виконано порівняльний аналіз модельно-орієнтованих методів функціональної діагностики та сформульований перелік основних завдань, що підлягатимуть подальшим дослідженням. Більше того, аналіз порівняльної таблиці показує, що переважну більшість прикладних задач функціональної діагностики можна успішно розв'язувати, залишаючись у рамках магістрального напрямку, заснованого на



концепції модельно-орієнтованих відновників, оскільки інші методи цього класу є лише окремими випадками. Стисло розглянуті альтернативні методи виявлення несправностей та їх локалізації на основі апарату нечіткої логіки та якісних моделей.

У другому розділі автором розглядалися методи синтезу пристроїв відновлення діагностичного типу, порядок яких співпадає з порядком контрольованої системи. Синтез таких пристроїв виконувався методами теорії функціональних відновників О' Рейллі - Луенбергера.

Виявлено, що спосіб обчислення матриці відновлюваності у диференціальній формі може бути ефективним інструментом при дослідженні різноманітних задач відновлення повноформатного вектора стану динамічних систем, фільтрації сигналів, а також при синтезі систем оптимального керування.

Значна увага приділена синтезу оптимальних відновників у диференціальній або рекурентній формі методом зважених найменших квадратів. Синтез виконано за допомогою спрощеного методу інваріантного занурення Р. Беллмана.

Встановлено, що структура оптимального пристрою відновлення не залежить від обраного критерію якості. Відмінності проявляється лише у значеннях матричного коефіцієнта передачі, який визначаються обсягом доступних апріорних даних.

Показано, що формування різницевого сигналу стійкого до сукупності збурень являє собою суттєвий момент у задачах, пов'язаних з модельно-орієнтованими методами виявлення та локалізації несправностей. Запропонована оновлена структура пристрою відновлення повного порядку з невизначеними входами.

Визначено, що головна перевага пристроїв відновлення повного порядку з невизначеними входами у порівнянні з іншими методами, що зазвичай використовують відновники Луенбергера заниженого порядку, проявляється у тому, що залишається більше ступенів свободи у проектуванні, після того як умови роз'єднання оцінок виходів системи від невизначених збурень уже виконані.

У третьому розділі дисертації, у межах загальної постановки задачі, автором розглядалися питання проектування стохастичних пристроїв відновлення вектора стану динамічних систем, що мають підвищену стійкість до несправностей у сенсорній підсистемі. Поставлені задачі розв'язувались на основі використання байєсової методології за умови наявності високоякісної розширеної номінальної математичної моделі системи, результатів спостережень пов'язаних з несправностями та апріорних даних щодо статистичних характеристик діючих шумів на рівні середніх значень та коваріаційних матриць. По-



будований пристрій відновлення повного порядку за умови відсутності несправностей.

Запропонована математична модель сенсорної підсистеми з невизначеним станом, в основу якої покладена реконструкція номінальної моделі каналу спостережень. Наявність невизначеного стану не виключає існування результатів спостережень різної точності, а несправності у сенсорній підсистемі розглядаються як окремий випадок цієї моделі і інтерпретуються у вигляді аномальних похибок. Внесена пропозиція строго аргументована.

Показано, що залишаючись у рамках байєсового підходу та гауссово-марковських моделей діючих шумів за допомогою запропонованої моделі каналу спостережень можна отримати оптимальний варіант пристрою оцінювання, проте його реалізація потребує використання сукупності модельно-умовних фільтрів Калмана. Уведення поняття псевдобайєсової оцінки дозволило отримати за рахунок втрати строгої оптимальності практично прийнятний варіант реалізації пристрою відновлення, стійкого до несправностей у каналі спостережень. Синтезований пристрій являє собою структуру, що складається з  $N$  модельно-умовних фільтрів Калмана, де  $N$  – число конкуруючих гіпотез.

На основі запропонованого підходу та реконструйованої моделі каналу спостережень розроблені методи побудови низки робастних пристроїв оцінювання, які маючи спрощену структуру або схему обчислень, все ж зберігають здатність протистояти дії несправностей, але у меншій мірі ніж оптимальні. Зокрема, запропонований варіант побудови робастного пристрою оцінювання з укороченою структурою, отриманий шляхом заміни паралельно працюючої пари модельно-умовних фільтрів Калмана одним фільтром, налаштованим на гіпотезу про справний стан каналу спостережень. Запропоновано метод побудови робастного пристрою оцінювання підвищеної швидкодії, який розроблявся з метою подолання труднощів обумовлених складністю розрахунків апостеріорної ймовірності справного стану каналу спостережень. Синтез робастного пристрою оцінювання лінійного типу виконувався з метою отримання гранично спрощеного способу отримання оцінок вектора стану, які ще мають мінімальну можливість протистояти впливу несправностей у каналі спостережень. Запропоновано метод подолання апріорної невизначеності щодо ймовірності появи аномальних похибок у каналі спостережень. Аналіз отриманих результатів показав, що розширення функціональних можливостей синтезованого пристрою потребує суттєвого ускладнення процедури обчислення ймовірності справної роботи каналу спостережень.

У четвертому розділі автором розглянуті питання, пов'язані з випадками коли несправності з'являються епізодично і настільки рідко, що статистичні дані про частоту їх появи відсутні. У такому разі застосування байєсового підходу



стає неправомірним. Одним із можливих шляхів вирішення проблеми може бути застосування компенсаційних схем, заснованих на принципах підвищення чутливості фільтра Калмана до раптових змін. Визначені напрямки подолання зазначеної проблеми. Визначено, що декомпозиція схеми фільтрації за методом Фрідланда є лише квазіоптимальною, а умова її локальної оптимальності полягає у відсутності стохастичної складової у моделі динаміки несправності.

Розглянута задача діагностики несправностей у підсистемах регулятора на основі застосування системи виявляючих фільтрів. В цьому ракурсі подальшого розвитку набув 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. Автором запропоновано альтернативний метод виводу рівнянь для фільтра Калмана з статистично-невизначеними входами. Відповідно до доказаних теорем, сформувані умови, за яких існує розв'язок задачі декомпозиції та запропонована методика проектування оптимального стохастичного відновника з невизначеними входами.

У п'ятому розділі наведено результати розроблення методів та алгоритмів модельно-орієнтованого роздільного оцінювання за наявності несправностей та збурень у тих випадках коли динаміка фізичного об'єкту зазнає раптових змін, причиною яких є некоректна робота окремих технічних вузлів, пристроїв або підсистем. З'ясовано напрямки розв'язання завдань модельно-орієнтованого роздільного оцінювання за наявності несправностей та збурень.

Перший з цих напрямків передбачає наявність математичних моделей дестабілізуючих факторів і використовує процедуру розширення вектора стану номінальної системи за рахунок внесення у її математичну модель фіктивного невідомого входу, асоційованого з впливом діючих несправностей та збурень.

Розглянута задача виявлення несправностей та їх локалізації за допомогою геометричного підходу, формуючи при цьому різницеві сигнали з направленими властивостями. Автором цей метод було модифіковано з метою розповсюдження на випадок лінійної дискретної системи, що зазнає впливу множинних несправностей та (або) збурень, структура яких є невизначною. Задача синтезу виконана для двох варіантів постановки задачі: детермінованої та стохастичної.

Значна увага присвячена методам синтезу фільтрів для роздільного оцінювання несправностей та вектора стану системи, які засновані на концепції Кітанідіса.

Представлена модель є більш розширеною і враховує несправності, що одночасно впливають, як на стан системи, так і на вихідні змінні, а збурення – лише на змінні стану. Синтез фільтра здійснено за допомогою метода зважених



найменших квадратів, а до процедури мінімізації долучались елементи варіаційного числення, зокрема метод векторних множників Лагранжа.

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. Запропоновано метод синтезу локально – оптимального трьохкаскадного фільтра розщепленого типу, який дозволяє враховувати появу несправностей та збурень не тільки у підсистемі «об'єкт-регулятор», а і у підсистемі спостережень.

Запропоновано метод синтезу ряду розщеплених фільтрів робастного типу, який базується на припущенні, повної 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.

Дослідження, що проводились у **шостому** розділі мали за мету наповнення фактичним матеріалом базових теоретичних положень розділів 3–5 на прикладі практичної задачі – посадки повітряного судна за допомогою радіотехнічної системи сантиметрового діапазону довжин хвиль. Окремо розглянуті питання: оцінки ефективності запропонованих методів оцінювання вектора стану посадкової системи за умови послаблення впливів несправностей, як у каналі спостережень так і у підсистемах об'єкта керування та їх доцільного використання у практичній діяльності; перевірки адекватності запропонованих математичних моделей несправностей у окремих підсистемах об'єкта керування, що допускають наявність спостережень різної точності включно з аномальними; збору статистичних даних щодо втрати працездатності кутомірної підсистеми унаслідок пропусків або хибних декодувань основних кутових функцій, закладених у форматі сигналу з наступним їх використанням у якості апріорних даних, необхідних для коректної роботи алгоритмів фільтрації підвищеної стійкості до дії аномальних похибок у каналах спостережень.

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 за критерієм «точність – достовірність – обчислювальні витрати». На основі розробленої номінальної моделі повітряного судна запропоновані два типи моделей динамічних систем за наявності несправностей та збурень. Досліджені характеристики точності оціню-



вання параметрів траєкторії повітряного судна на етапі вирівнювання – висоти повітряного судна, кута тангажу та швидкості їх зміни 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 розділу присвячена результатам моделювання більш складної та практично значимої задачі функціональної діагностики – роздільному оцінюванні 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. Дослідженню підлягали характеристики точності оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна для двох різновидів робастних структур, побудованих на основі модифікованих фільтрів Фрідланда та Кітанідіса. Методом напівнатурних випробовувань експериментально отримана низка залежностей ймовірності справного стану кутомірного радіоканалу від інтенсивності дестабілізуючих факторів, які бралися до уваги у якості апіорних даних при проектуванні пристроїв фільтрації з підвищеною стійкістю до порушень працездатності кутового каналу посадкової системи. Робота завершується висновками, які впливають зі змісту роботи та є логічними.

Виходячи з аналізу основної частини дисертації, можна зробити висновок, що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою.

**Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання.** Отримані в дисертаційному дослідженні результати характеризуються теоретичною та практичною значимістю. Вони можуть бути використані для подальшого теоретичного та експериментального дослідження, а також розроблення нових модельно-орієнтованих пристроїв функціональної діагностики для радіотехнічних систем різноманітного призначення. Систематизований і структурований практичний матеріал дозволяє надавати проектувальнику науково-обґрунтований набір алгоритмів високонадійної фільтрації з урахуванням конкретних вимог для кожного, окремо взятого випадку. Рішення, запропоновані автором у роботі, можуть знайти попит у проектних організаціях, конструкторських бюро, науково-дослідних інституціях пов'язаних з розробкою зразків нової високонадійної техніки, інститутах підвищення кваліфікації, перепідготовки інженерно-технічних кадрів та особливо у закладах вищої освіти, підприємствах та організаціях, які займаються капітальним ремонтом технічних засобів та поточною профілактикою несправностей. Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення ефективності засобів функціональної діагностики радіотехнічних та радіоелектронних систем різноманітного призначення: для



задач діагностики технічного стану та обробки даних результатів контрольних вимірювань технічних параметрів інструментальної системи посадки та комплексної радіонавігаційної системи; в задачах діагностики технічного стану радіоелектронних пристроїв, авіаційних контрольно-вимірювальних приладів та їх відновлювального ремонту; у напрямках технічної експлуатації радіолокаційних та радіонавігаційних систем ближньої навігації. Це підтверджується наведеними актами впровадження результатів дисертаційних досліджень.

**Повнота викладення в опублікованих працях отриманих у роботі результатів.** Здобувачем за темою дисертації опубліковано 52 наукових праці з яких 10 одноосібних, у тому числі: 2 монографії; 13 статей опубліковано у виданнях, що входять до переліку фахових видань; 3 статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напряму, з якого підготовлено дисертацію; 6 статей у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз даних; 5 патентів на корисну модель; 26 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

Основні положення роботи апробовані на багатьох міжнародних наукових конференціях та семінарах, у тому числі зарубіжних. Спрямованість наукових конференцій та семінарів, на яких відбувалась апробація дисертаційного дослідження, характер статей здобувача, в яких відображено наукові положення дисертації і результати проведених досліджень, повного мірою розкривають дослідницьку задачу. Представлення результатів наукової роботи є, на мій погляд, достатніми. Кількість публікацій, обсяг, якість, повнота висвітлення результатів та розкриття змісту дисертації відповідає вимогам Міністерства освіти України. Вважаю, що дисертація пройшла належну апробацію, є самостійною науковою працею, що має завершений характер.

**Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.** Ознайомлення з авторефератом дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом автореферат відповідає вимогам, що ставляться МОН України до авторефератів дисертаційних робіт. У тексті автореферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого здобувачем дисертаційного дослідження. Зміст автореферату та основних положень дисертації є ідентичними.

#### **Загальні зауваження.**

1. На мій погляд, об'єм основного змісту дисертації можливо було скоротити за рахунок винесення в додатки деяких рисунків, таблиць та проміжних математичних викладок та доказів. Наприклад рисунки 1.1 та 1.2 не несуть додаткової інформації до текстових пояснень підрозділу 1.1.2, рисунки 6.3 – 6. 6,



6.11 мають суто ілюстративний характер, рисунки 6.55 – 6.59 по своїй суті являють собою допоміжну апріорну інформацію; математичний доказ теорем стор. 126, стор. 133, стор. 136, стор. 139, стор. 234; таблиця 1.1 стор. 109, таблиця 2.1 стор. 150. Висновки до розділу 6 є занадто розширеними і перевантажені математичними формулами.

2. Розуміння сутності фізичних процесів представлених деякими графіками результатів моделювання у підрозділі 6.6.2 ускладнює незрозумілі позначення на їх легендах (рис 6.23 – 6.26).

3. Основним методом опису поведінки динамічних систем в представленій роботі є метод простору станів з використанням математичного апарата векторної алгебри. При цьому, не зовсім зрозумілою стає мета використання автором у підрозділі 1.9 передатних функцій для опису структури генератора залишкового сигналу у частотній області.

4. У розділі 2, при розгляді питань відновлюваності лінійних динамічних систем згідно означення 2.3.1 (підрозділі 2.3.1), була доведена відповідна теорема 2.3.1 стосовно існування спеціальної матриці відновлюваності у інтегральній формі. Потребує роз'яснення щодо мети розгляду того ж критерію у диференціальній формі у наступному підрозділі 2.3.2.

5. У ході текстових пояснень до рівнянь, що описують структури модельно орієнтованих діагностичних пристроїв, в основу яких закладені різноманітні модифікації розширеного фільтра Калмана, зустрічаються формулювання стосовно його входів: «невизначений вхід» (стор. 163), «невідомий вхід», «фіктивний вхід» (стор. 243), «неконтрольований вхід» (стор. 235). Така стилістична неоднозначність потребує додаткового обґрунтування.

6. Цікаво було б порушити питання стосовно побудови банку квазіоптимальних фільтрів укороченої структури для задачі багатогіпотезного розпізнавання відносно запропонованої моделі сенсорної підсистеми (3.27). Нажаль, з текстуальної частини підрозділі 3.6 та запропонованого методу синтезу, можливість реалізації такого розпізнавання не зовсім зрозуміла.

7. З тексту підрозділу 5.3 не зрозуміло, яким чином набуваються саме робастні властивості фільтра інваріантного до збурень невідомої структури.

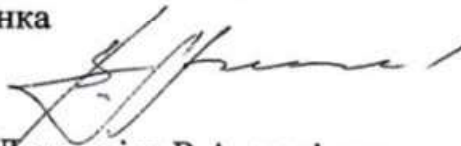
8. У підрозділі експериментальних напівнатурних випробувань [6.8, стор. 376] відсутні пояснення, щодо способу отримання статистичних даних стосовно ймовірностей зриву синхронізації кутомірного каналу від значень дестабілізуючих факторів.

Однак, на мій погляд, виявлені недоліки не знижують загальну позитивну оцінку наукової значимості і практичної цінності дисертаційної роботи.



Висновки. Дисертаційна робота Воловика А.Ю. «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» є закінченим науковим дослідженням, містить нові теоретичні і практичні результати та 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), а її автор Воловик Андрій Юрійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 - радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри інформаційних  
систем та технологій  
Київського національного університету  
ім. Тараса Шевченка



Володимир ДРУЖИНІН

Підпис професора Дружиніна В.А. засвідчую  
Заступник декана ФІТ КНУ ім. Тараса Шевченка  
з наукової роботи

к.т.н

«29» 05 2024 року.



Григорій. ГНАТІЄНКО