



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з наукової роботи та міжнародного співробітництва ВНТУ

Володимир ГРАБКО

« 23 » 06 2023 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації доцента кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету кандидата технічних наук, доцента **ВОЛОВИКА Андрія Юрійовича** на тему «**Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю**», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю **05.12.13. – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій**

Призначені рішенням Вченої ради Вінницького національного технічного університету (протокол № 9 від «30» 03 2023 р.) рецензенти, а саме:

- **БОНДАРЕВ Андрій Петрович**, професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка», доктор технічних наук, професор;
- **ПОЛІКАРОВСЬКИХ Олексій Ілліч**, професор кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій Одеський національний морський університет, доктор технічних наук, професор;
- **МИХАЛЕВСЬКИЙ Дмитро Валерійович**, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету, доктор технічних наук, доцент;

розглянувши докторську дисертацію **ВОЛОВИКА Андрія Юрійовича** «**Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю**» (тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Вінницького національного технічного університету від «28» жовтня 2019р. протокол №4 і перезатверджено на засіданні Вченої ради Вінницького національного технічного університету від «30» 03 2023р. протокол № 9), наукові публікації, в яких висвітлено основні наукові результати, а також за результатами спільного фахового семінару кафедр інфокомунікаційних систем і технологій та інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету (протокол № 2а від «18» квітня 2023р.), підготували висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів докторської дисертації:

1. Дисертація ВОЛОВИКА Андрія Юрійовича, представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13. – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій, є кваліфікаційною науковою працею, підготовленою у вигляді рукопису, характеризується єдністю змісту, відповідає принципам академічної доброчесності, підготовлена здобувачем самостійно. За обсягом, актуальністю, рівнем наукової новизни та практичної цінності робота відповідає вимогам п. 7-9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17 листопада 2021 року

2. **Актуальність теми дисертації.** Сучасне урбанізоване суспільство при реалізації великомасштабних технічних проєктів зіткнулося з проблемою забезпечення належного рівня надійності та гарантування заданого ступеню безпеки. У першу чергу це стосується таких пріоритетних областей діяльності, як: авіаційна, оборонна, космічна, енергетична, та інші. Характерною рисою систем зазначеної групи є висока технологічна конвергенція, значна вартість, наявність екстремальних умов та потенційна небезпека у процесі їх експлуатації. Традиційні методи забезпечення функціонування у режимі реального часу, заснованих на багатократному апаратному резервуванні та уведенні систем вбудованого контролю, як правило, супроводжуються підвищенням вартості резервного обладнання, експлуатаційних витрат на технічне обслуговування, збільшенням ваги, габаритів, і може не завжди давати бажаного ефекту по тій причині, що у багатьох випадках численні резервні складові самі стають джерелами потоків відмов та несправностей. Тим самим, штучне уведення додаткової надмірності на фізичному рівні, за певних умов, стало стримуючим фактором на шляху побудови високонадійних технічних систем.

Загально світові тенденції розвитку напрямку відмовостійкого керування складними об'єктами констатують, що за наявності протиріч між вартістю, складністю та надійністю більш доцільним є використання методів модельно-орієнтованої концепції з аналітичною надлишковістю, основою на спільних вимірах різнотипних фізичних величин з метою їх перехресного контролю. Головна перевага концепції – відсутність встановлення додаткового обладнання, а значить і відсутність додаткових несправностей. У зв'язку із цим вона є більш економічно привабливою та у разі потреби може ефективно доповнювати вже існуючу концепцію фізичної надлишковості, без здійснення суттєвої технологічної модернізації.

Беззаперечним підтвердженням висвітленої проблематики є авіаційна індустрія де рівень забезпечення безпеки польотів визначається ймовірністю льотної пригоди на рівні 10^{-7} , а технічне обладнання і устаткування має суттєву фінансову вартість. 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. Просторово розподілені і функціонально інтегровані радіотехнічні системи різноманітного призначення не зв'язані між собою єдиною мережею керування, що робить неможливим проведення централізованої діагностики у випадку порушення функціонування тої чи іншої підсистеми. Зазначена

проблема набирає ще більшої актуальності в ситуаціях, що стосуються критичних етапів польоту, наприклад у разі несприятливих погодних умов або на етапі заходу повітряного судна на посадку, коли час для прийняття життєво важливих рішень обмежений а помилкове прийняття рішення призводить до неминучих катастрофічних наслідків. Не виключенням є і високо інтегровані радіонавігаційні комплекси надсучасних БПЛА багаточільового призначення де апаратне резервування є недоцільним чи то з економічної точки зору чи то чисто з міркувань забезпечення необхідних тактико-технічних характеристик. В цьому випадку наявність несправностей створених дією пошкоджень, збоїв або відмов вважається припустимим і за таких умов формується адекватний сигнал керування, спрямований на парирування наслідків дії порушень функціональності з метою забезпечення виконання головного завдання відповідно до призначення. У всіх цих випадках, для прийняття відповідних рішень, виникає потреба у розробці методів та пристроїв формування діагностичних ознак, що характеризують поточний стан об'єкту та його систем у реальному часі та порівняння отриманих ознак з основними показниками якості їх функціонування.

Розрізнена множина існуючих методів у цьому напрямку, дозволяє частково вирішувати задачі виявлення, локалізації та ідентифікації несправностей з різних точок зору, але при цьому, строге наукове теоретичне обґрунтування досі залишається відсутнім. Виникає потреба у формуванні наукового підходу який дозволяє з єдиної позиції розглядати, як детермінований так і стохастичний варіант постановки задачі виявлення несправностей, їх локалізацію та ідентифікацію у динамічних системах, що працюють у неперервному або дискретному часі, досягати високої оперативності виключаючи потребу встановлення нового обладнання та уникнення появи додаткових джерел несправностей, використовувати добре розвинений математичний апарат матричної алгебри доповнений загально доступними та високо ефективними пакетами прикладних програм.

Одним з важливих показників актуальності та перспективності обраного наукового напрямку є зростаюче число доповідей та публікацій, зроблених на спеціальних сесіях авторитетних міжнародних конференцій по безпеці промислових процесів, конференціях з питань нейронних мереж, нечітких множин та штучного інтелекту. Усе це підтверджує правильність обраного наукового напрямку, його актуальність та перспективність.

Таким чином, необхідність в зменшенні кількості відмов та несправностей, часових, виробничих, фінансових витрат з одночасною потребою в підвищенні оперативності та достовірності діагностичної інформації, що притаманні технічним системам гарантованої надійності, з однієї сторони, та відсутність достатніх знань щодо закономірностей формування діагностичних ознак, що характеризують функціональні зв'язки з основними показниками технологічної якості таких систем, з іншої сторони, постають **в протиріччі**, що породжує актуальну науково-технічну проблему на розв'язок якої спрямовано проведене дисертаційне дослідження.

Представлена дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної **науково-технічної проблеми** – розробленню на системній основі нових та вдосконаленні відомих методів, пристроїв та алгоритмів формування сигналів–носіїв діаг-

ностичних ознак, 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, що сприяє підвищенню рівня забезпечення безпеки польотів в цілому. Її розв'язок, в загальному плані, дозволяє знизити часові, виробничі і фінансові витрати, покращити техніко-економічні, екологічні показники та уникнути катастрофічних наслідків у разі появи екстремальних умов експлуатації авіаційної техніки.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри інфокомунікаційних систем і технологій та кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету.

Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи використовувалися в наступних науково-дослідних роботах: 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.

4. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів.

Дисертація є самостійною науковою працею, в якій висвітлені власні ідеї і розробки автора, що дозволили вирішити поставлені завдання. Теоретичні положення, практичні результати і висновки, сформовані автором особисто. Всі задекларовані результати стосовно основного змісту дисертаційної роботи, що виносяться на захист отримані самостійно. Частина з них викладено в одноосібних роботах [16, 17, 6, 18, 19, 32, 39, 40, 41, 43, 45, 46].

Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і наведені лише для підкріплення власних ідей автора.

Постановка основних завдань дослідження, структура роботи та узагальнення отриманих результатів обговорювалися спільно з науковим консультантом.

У працях, що відображають основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації авторові належать: у роботах [25, 27, 28, 37] аналіз резервів підвищення точності і достовірності кутових вимірювань у радіотехнічних засобах систем посадки повітряних

суден, розроблення методів синтезу пристроїв фільтрації стійких до порушень працездатності радіотехнічних засобів та відповідних математичних моделей, основні експериментальні результати; [26] математичні аспекти синтезу цифрового вимірювального пристрою; [1, 10, 44] розробка методів синтезу стохастичних відновників діагностичного типу інваріантних до статистично неозначених входів; [2] розробка методу синтезу виявляючого фільтру у завданнях діагностики лінійних динамічних систем; [3] метод синтезу модифікованого фільтра Калмана стійкого до невизначених збурень, узагальнення результатів моделювання; [4] теоретичне обґрунтування методів локально-оптимального роздільного оцінювання для пристроїв функціональної діагностики; [7, 8, 9, 36] розробка методів синтезу пристроїв оцінювання результатів кутових вимірювань, експериментальна частина, оцінка ефективності запропонованих алгоритмів; [13] обґрунтування математичної моделі, синтезу пристроїв оцінювання різноточних кутових вимірювань; [11, 14, 35] методи апроксимації розширеного фільтра Калмана, необхідні умови деконпозиції, результати моделювання; [12, 31] обґрунтування моделі спостережень для динамічної системи за наявності стрибкоподібних раптових несправностей, синтез пристрою виявлення несправностей та оцінки часу її виникнення; [15] аналіз методів підвищення точності джитера в стохастичних системах; [5] модель каналу спостережень при наявності різноточних результатів спостережень, синтез пристроїв псевдо байєсового оцінювання, методи синтезу робастних пристроїв оцінювання; [29, 30] синтез оптимальної передаточної функції фільтру, аналіз отриманих результатів; [33, 47] обґрунтування структури формувача залишкового різницевого сигналу; [34] розробка нелінійних методів апроксимації вольт-амперної характеристики; [38] алгоритм шумової фільтрації сигналу відеоконвертора; [42] розробка апаратної реалізації запропонованого алгоритму функції згортки; [48] алгоритмічна реалізація селектора цифрових даних; [49, 52] розробка математичних моделей радіосигналів, синтез алгоритму частотного аналізатора, програмна реалізація; [50] алгоритм комплексної оцінки енергетичної складової шуму; [51] програмна реалізація розробленої математичної моделі, аналіз достовірності результатів моделювання; [20] запропоновано спосіб розгортання обладнання посадкової системи на місцевості; [21, 22-24] експериментальне дослідження властивостей запропонованих сенсорів повітряного тиску та концентрації газу, статистична верифікація стабільності параметрів отриманого пристрою.

З наукових праць, опублікованих в співавторстві, у дисертаційному дослідженні використовуються лише ті положення, що є результатом особистої роботи автора.

5. Ступінь використання у дисертації матеріалів і висновків кандидатської дисертації здобувача. У докторській дисертації «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» матеріали кандидатської дисертації «Методи та пристрої обробки радіосигналів інваріантні до порушень працездатності авіаційної системи посадки» Воловика Андрія Юрійовича не використовувались.

6. Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків, рішень, рекомендацій, які сформульовані в дисертації. Висвітлені в дисертаційній роботі Воловика А.Ю. наукові положення, висновки, рекомендації і практичні результати є обґрунтованими, достовірними та апробованими. Обґрунтування розвинутих наукових положень базується на глибокому теоретичному аналізі досліджених процесів, що забезпечується використанням теоретичних постулатів векторної матричної алгебри, основних положень теорії статистичних рішень, методів зважених найменших квадратів або елементів варіаційного числення. Використані у роботі 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/або вже використані у прикладних задачах стосовно модельно-орієнтованих системах діагностики радіотехнічних систем з підвищеним функціональним захистом від несправностей.

У теоретичних дослідженнях достовірність результатів обумовлена використанням фізично обґрунтованих припущень щодо побудови й аналізу математичних моделей детермінованих і стохастичних динамічних систем безперервного і дискретного часу та була підтверджена задовільною збіжністю з результатами напівнатурного експерименту.

З метою практичної апробації розроблених теоретичних методів синтезовано ряд пристроїв у вигляді обчислювальних алгоритмів, які реалізовано на базі сучасних програмних комплексів і їх вбудованих функцій, зокрема MATLAB, Simulink.

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.

7. Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку теоретичних засад побудови математичних моделей динамічних систем з супутніми несправностями з метою формування сигналів спеціального типу та методів синтезу пристроїв їх обробки у радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю, які разом з комплексом системних заходів сприяють підвищенню показників надійності, точності та інформаційної достовірності результатів оцінювання їх стану. Найбільш вагомими результатами, одержаних особисто автором, є такі:

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 межах 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;

- 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 у динамічних системах, що працюють у неперервному або дискретному часі; досягати високої оперативності без потреби встановлення додаткового обладнання, що виключає появу нових 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;

- 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, що дозволило встановити взаємозв'язок між ваговими коефіцієнтами, на основі яких будується підсумкова оцінка вектора стану. На відміну від відомих, приведена методологія відрізняється відмовою від принципу автономності складових розщепленого фільтра та охоплені їх системою перехресних зв'язків, уведенням у блок екстраполяції основного фільтра додаткового корегувального входу, що скеровується виходом окремого фільтра, виключно орієнтованого на оцінку несправностей та уведенням одноктного зсуву часових шкал для розщеплених фільтрів;

- у межах розробленої методології, запропоновано метод синтезу локально – оптимального трьох каскадного 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, роздільно оцінювати як вектор стану системи, так і вектори присутніх у системі несправностей та збурень;

- 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;

ції. На відміну від відомих, 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, 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, де на відміну від відомих результатів 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;

- 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.

набули подальшого розвитку:

- основи теорії синтезу пристроїв відновлення векторів стану лінійних динамічних систем, інваріантних щодо дії несправностей у каналі спостережень, що передбачає можливість отримання, у межах байєсової методології, оптимального пристрою відновлення повного порядку у вигляді паралельно діючої структури з N модельно-умовних фільтрів Калмана, використання якої дозволяє, на відміну від відомого стандартного фільтра Калмана, більш ніж на порядок послаблювати вплив аномальних похибок на результуючу точність оцінювання за умови помірного зростання обчислювальних витрат. З метою подолання апріорної невизначеності щодо ймовірностей появи аномальних похибок у каналі спостережень запропонований адаптивний варіант побудови пристрою оцінювання псевдобайєсового типу;

- метод виявлення множинних несправностей у підсистемах об'єкта контролю та їх роздільного оцінювання у межах геометричного підходу, який відрізняється від відомих запровадженням процедури 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. У підсумку це призводить до зменшення розмірності розв'язуваної задачі та економії обчислювальних ресурсів;

- метод сукупного виявлення та ідентифікації раптових змін у окремих складових вектора стану лінійної дискретної системи, у якому на відміну від відомих результатів, 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;

- 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. Зокрема, у межах розробленого підходу запропоновано:

- метод синтезу робастного фільтра, у якому завдяки структурним спрощенням та уведенню блоку корегування матричного коефіцієнта передачі з'являється можливість у випадку появи несправностей у сенсорній підсистемі переводити його у режим екстраполяції, не використовуючи при цьому мало достовірні результати спостережень, а у випадку відсутності несправностей здійснити перехід у режим роботи звичайного фільтра Калмана. При цьому досягається майже двократна економія обчислювального ресурсу за рахунок незначного погіршення точності порівняно з оцінками псевобаєсового типу;

- метод синтезу робастного фільтра підвищеної швидкодії, у якому процедура обчислень апостеріорної ймовірності справного стану каналу спостережень замінена селекторною схемою, що працює за правилами бінарної логіки. Це виключає появу запізнь при формуванні сигналу керування матричним коефіцієнтом передачі, що актуально для об'єктів зі швидкою динамікою та великою частотою оновлення результатів спостережень. При цьому з рахунок вилучення складних розрахунків апостеріорних ймовірностей досягається значна економія обчислювальних витрат;

- метод синтезу робастного пристрою оцінювання лінійного типу, структура якого базується на розрахунках коваріаційної матриці похибок фільтрації тільки на основі апріорних даних, що було досягнуто шляхом вилучення блоків обчислення апостеріорних ймовірностей та їх заміни апріорно відомими величинами з використанням лінійної залежності поточних оцінок від результатів спостережень. Результатом уведених спрощень стало максимальне спрощення алгоритму з точки зору обчислювальних витрат зі збереженням мінімальних функціональних можливостей протидії несправностям у каналі спостережень.

8. Практичне зазначення одержаних результатів. Проблема функціонального захисту радіоелектронних та телекомунікаційних систем від можливих порушень працездатності носить комплексний системний характер і актуальна на усіх етапах життєвого циклу системи від проектування до утилізації. У межах запропонованого наукового підходу з урахуванням особливостей розроблених методів, моделей, пристроїв та реалізованих алгоритмів оцінювання отримані наступні практично значимі результати:

– для випадку коли ЗПС допускає двосторонню посадку ПС у межах регламентованих норм запропоновано спосіб розгортання кутового обладнання на місцевості, який сприяє майже двократному розвантаженню диспетчерської служби аеропорту від надлишкової інформації на екранах індикаторних пристроїв. Новизна запропонованого способу захищена патентом України;

– доопрацьовані математичні моделі динаміки ПС, які на відміну від відомих результатів враховують наявність несправностей у окремих підсистемах системи керування польотом. На основі запропонованих моделей розроблений пакет програм статистичного моделювання, який дозволяє виконувати порівняльний аналіз розроблених пристроїв оцінювання за критерієм точність-достовірність-обчислювальна ефективність та ранжувати їх у певному порядку;

– для ділянки планерування ПС розроблено оптимальний пристрій оцінювання 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 співпадають з точністю оптимальної процедури. Показано, що практична реалізація адаптивної схеми потребує значних обчислювальних ресурсів, а через повільність процесу подолання апріорної невизначеності її доцільно застосовувати до систем з повільною динамікою та невисокою частотою оновлення даних;

– розроблено робастний фільтр структурно-укороченого типу. Синтезований фільтр здатен забезпечити показники точності оцінювання по відношенню до стандартного фільтра Калмана діапазон виграшу точності у перехідному режимі сягає від 20 до 70 разів, а в усталеному режимі – до 20 разів. Фільтр рекомендовано у якості простого та ефективного засобу захисту підсистеми спостережень від порушень працездатності, оскільки його обчислювальні витрати лише на 15-20% перевищують витрати стандартного фільтра Калмана;

– розроблено фільтр підвищеної швидкодії зі збереженням функції захисту від аномальних похибок у каналі спостережень який забезпечує показники точності майже у 10 -15 разів кращі за показники стандартного фільтра Калмана, але поступається оптимальним значенням що найменше у 4 рази у перехідному та у 1.5–2 рази в усталеному режимах роботи;

– запропоновано робастний пристрій оцінювання лінійного типу максимально спрощеної структури, який зберігає можливості захисту від впливу аномалій лише у тій частині фільтраційного процесу, яка узгоджена з наявними апріорними даними. Даний фільтр, може забезпечити виграш у точності порівняно з фільтром Калмана у межах від 2 до 2, 5 разів за винятком перехідного режиму роботи, де програш у точності досягає до 1.5–2 раз за рахунок появи динамічних похибок;

– доопрацьована номінальна модель динаміки 4–го порядку, яка апроксимує короткоперіодичну складову поздовжнього руху ПС на завершальному етапі посадкового маневру – вирівнюванні. У підсумку це дозволило адаптувати номінальну модель до особливостей процесу вирівнювання за наявності несправностей та збурень і сприяло зростанню точності процесу ідентифікації несправностей;

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

тного фільтра Калмана. Основні результати зводяться до наступного:

– результати моделювання роботи стандартного фільтра Калмана показали його неспроможність усунути залежність отриманих оцінок від впливу несправностей. Наслідком є розбіжність процесу фільтрації та неможливість розрізнення сигналу несправності на фоні шумів, що може породжувати нештатну ситуацію у посадковому процесі;

– результати моделювання модифікованого фільтра Кітанідіса з невідзначеними входами показали, що оцінки висоти прямують до її фактичного значення лише у асимптотичному розумінні. У цілому фільтр адекватно віддзеркалює фактичну зміну висоти, за винятком перехідного процесу з величиною похибки приблизно 1–1,5 м. По мірі збіжності процесу оцінювання екіпаж ПС отримує об'єктивну оцінку фактичної висоти і здатен виконати корегувальні дії з метою дотримання регламентованої траєкторії зниження;

– результати моделювання модифікованого фільтра Фрідланда ілюструють реалізацію роздільних властивостей у повній мірі та його локальну оптимальність у межах дії уведених обмежень, дотримуватися яких з практичної точки зору значно простіше на відміну від обмежень, запропонованих у раніше відомих роботах;

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

– поєднання результатів стендових напівнатурних випробовувань з результатами статистичного моделювання та використанням номограм виграшів у точності оцінювання за наявності несправностей, як у каналі спостережень так і у підсистемі «об'єкт–регулятор», дозволяє надавати у руки проектувальника науково обґрунтований набір алгоритмів високонадійної фільтрації з урахуванням конкретних вимог для кожного, окремо взятого випадку.

9. Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих наукових працях. Дисертація Воловика А. Ю. містить особисто отримані здобувачем науково обґрунтовані результати, а кількість та якість наукових праць, опублікованих за її матеріалами, відповідають постанові Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 року «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», що затверджує «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук».

Основні положення й наукові результати дисертації опубліковані у 52 наукових працях серед яких: 6 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, які індексовані міжнародними наукометричними базами даних Scopus, та/або Web of Science (1 – без співавторів), 13 статей у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань України (4 – без співавторів); 1 монографія, що опублікована за темою дослідження українською мовою; 1 публікація – розді-

ли у монографіях, що опубліковані у закордонних виданнях; 26 матеріалів і тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, 5 патентів на корисну модель.

Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

1. **Volovik A.**, Krylik L., Kobylyanska I., Kotyra A., Amirgaliyeva S. Methods of stochastic diagnostic type observers. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. 2018. Vol. 108082X4; 7 pages. doi: 10.1117/12.2501693. (Scopus). (Здобувачем запропоновано метод синтезу стохастичних відновників діагностичного типу інваріантних до статистично неозначених входів, визначені умови збіжності похибок оцінювання).

2. **Volovyk A.**, Kychak V. Detection Filter Method in Diagnostic Problems for Linear Dynamic Systems. *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*. 2021. Iss. 84. P. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.84>. (Web of Science) (Здобувачем запропоновано метод синтезу виявляючого фільтру у завданнях діагностики лінійних динамічних систем, визначені умови збіжності похибок оцінювання, проведено моделювання).

3. **Volovyk A.**, Kychak V., Havrilov D. Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2021. Vol 18. No 10. P. 21-41. DOI: 10.12700/APH.18.10.2021.10.2. (Q2, Web of Science). (Здобувачем запропоновано метод синтезу модифікованого розширеного фільтра Калмана стійкого до невідомих збурень, наведені докази гарантування стійкості, обмеженості, та оптимальності, проведено моделювання та подані його узагальненні результати).

4. **Volovyk A.**, Kychak V., Osadchuk A., Zhurakovskiy B. Fault Identification in Linear Dynamic Systems by the Method of Locally Optimal Separate Estimation. In: *Klymash, M., Luntovskyy, A., Beshley, M., Melnyk, I., Schill, A. (eds) Emerging Networking in the Digital Transformation Age. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, Cham. 2022. vol 965. P. 634-651. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_37. (Scopus). (Здобувачем надане теоретичне обґрунтування методів локально-оптимального роздільного оцінювання для пристроїв функціональної діагностики, запропонований метод синтезу фільтра для роздільного оцінювання несправностей та вектору стану лінійної динамічної системи на фоні збурень невідомої структури, запропонована модель руху повітряного судна на ділянці вирівнювання).

5. **Volovyk A.**, Pyrih Y., Urikova O., Masiuk A., Shubyn B., Maksymyuk T. Dynamic System State Estimation with a Resilience to Observation Data Anomalies. *Contemp. Math*. 2024. Vol 5. Iss 1 P. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.37256/cm.512024> (Scopus) (Здобувачем розроблена модель каналу спостережень при наявності різномірних результатів спостережень, проведений синтез пристроїв псевдобайєсового оцінювання, розроблені методи синтезу робастних пристроїв оцінювання).

6. **Volovyk A.** Synthesis of quasi-optimal fast filters by the least square criterion. *Advanced Information Systems*. 2023. V. 7. № 2 P. 21-27 <https://doi.org/10.20998/>

2522-9052.2023.2.04 (Scopus) (Здобувачем розроблений метод оптимізації параметрів стандартного фільтра Калмана з метою зменшення обчислювальної складності і підвищення його швидкодії).

Статті у наукових фахових виданнях України:

7. Кичак В.М., Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.**, Шутило М.А., Загорський В.В. Оптимальна фільтрація різноточних кутових вимірювань в системі посадки сантиметрового діапазону. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2011. № 3 Т.1. С. 154-161. (Здобувачем виконаний аналіз динаміки руху повітряного судна у режимі заходу на посадку, розроблена відповідна математична модель, виконаний синтез нелінійного пристрою оцінювання, виконано моделювання).

8. Воловик Ю.М., **Воловик А. Ю.**, Шутило М.А., Загорський В.В. Адаптивна фільтрація різноточних кутових вимірювань в системі посадки сантиметрового діапазону. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2012. № 4. Т.1. С. 62-69. (Здобувачем запропонований метод синтезу адаптивного фільтра в умовах відсутності апріорних даних стосовно справності радіовимірювального каналу).

9. Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.**, Шутило М.А., Загорський В.В. Квазіоптимальна фільтрація різноточних кутових вимірювань в системі посадки сантиметрового діапазону. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2012. № 3. Т.1. С. 110-117. (Здобувачем запропонований метод синтезу квазіоптимального фільтра зі стробуванням, виконана експериментальна частина, виконана оцінка ефективності запропонованих алгоритмів;).

10. **Воловик А.Ю.**, Кичак В. М. Основи теорії функціональних відновлювачів діагностичного типу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 3. С. 109-118. (Здобувачем розроблені теоретичні основи методу синтезу стохастичних відновників діагностичного типу інваріантних до невизначених входів, доказані умови його існування, проведено випробування методики проектування зазначених пристроїв оцінювання).

11. **Воловик А.Ю.**, Осадчук О. В., Червак О. П., Шутило М. А. Оптимальне оцінювання систематичних похибок при виконанні комплексних спостережень. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. №4(251). С. 214-218. (Здобувачем розроблений метод апроксимації розширеного фільтра Калмана, доказані необхідні умови декомпозиції, обґрунтовані умови і результати моделювання)

12. **Воловик А.Ю.**, Осадчук О. В., Васильківський М. В., Червак О. П., Шутило М. А. Діагностика раптових змін у динаміці об'єктів контролю. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 1(257). С. 88-93. (Здобувачем виконано обґрунтування моделі спостережень для динамічної системи за наявності стрибкоподібних раптових несправностей, виконаний синтез пристрою виявлення несправностей та оцінки часу її виникнення)

13. **Воловик А.Ю.**, Гаврілов Д. В., Мозговий В. С. Розробка моделі траєкторних спостережень для авіаційної посадкової системи *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 6(267). С. 173-182. (Здобува-

чем виконано обґрунтування математичної моделі руху повітряного судна по куту місця, здійснено синтез оптимального пристрою оцінювання, виконана оцінка ефективності запропонованого алгоритму)

14. **Воловик А.Ю.**, Гаврілов Д. В. Апроксимація розширеного фільтра Калмана паралельною двокаскадною структурою. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. № 4. С. 107-115. (Здобувачем розроблено метод синтезу модифікованого розширеного фільтра Калмана, визначені необхідні умовні обмеження для декомпозиції, проведено моделювання на основі апріорних даних отриманих під час проведення напівнатурного експерименту)

15. Васильківський М.В., **Воловик А.Ю.**, Паламарчук Р.П. Метод оцінювання джитеру в цифрових радіоприймальних пристроях. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 2(271). С. 167-173. (Здобувачем виконаний аналіз методів підвищення точності джитера в стохастичних системах на основі пристроїв оптимальної фільтрації)

16. **Воловик А.Ю.** Адаптивне оцінювання параметрів руху повітряного судна у режимі дотримання заданої посадкової траєкторії. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Львів. 2022 Вип. 2. № 2. С. 67–78. DOI: <https://doi.org/10.23939/ict2022.02.067>. (Здобувачем виконаний синтез пристрою оцінювання параметрів посадкової траєкторії повітряного судна, за умов її апріорної невизначеності, на основі алгоритму структурної адаптації, обґрунтована методика проведення обчислювального експерименту)

17. **Воловик А.Ю.** Адаптивне оцінювання стану динамічних систем за наявності несправностей у каналі спостережень. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2022. Том 33(72). № 6 С. 35-42. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/07>. (Здобувачем запропоновані методи синтезу квазіоптимального та адаптивного пристроїв оцінювання на випадок апріорної невизначеності щодо ймовірностей появи несправностей).

18. **Воловик А.Ю.** Локально оптимальні робастні оцінки стану лінійних систем з невизначеними входами. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2023. Том 34(73). № 2 2023 С. 56-61. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/09>. (Здобувачем запропоновано альтернативний варіант фільтра Кітанідіса, який формує незміщені оцінки вектора стану з мінімальною дисперсією для лінійної дискретної системи при наявності невизначених входів)

19. **Воловик А.Ю.** Оптимальні оцінки вектора стану для дискретних стохастичних систем з невизначеними збуреннями та шумом. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. Львів. 2023. Вип. 3. № 2. С. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.23939/ict2023.09.067>. (Здобувачем запропоновано метод синтезу пристрою формування оптимальних оцінок вектора стану нестационарної динамічної системи, які мають ознаки стійкості до впливу неконтрольованих збурень та шумів, запропонована модель руху повітряного судна у режимі планування, що спирається на практично отримані результати досліджень)

Патенти України на корисну модель:

20. Кичак В.М., Осадчук О.В., **Воловик А.Ю.** Спосіб позиціонування основної й резервної радіолокаційних систем посадки: патент 119334 Україна на корисну модель. № u201702284 ; заявл. 13.03. 2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. №18. 4 с. *(Здобувачем запропоновано спосіб розгортання обладнання посадкової кутомірної системи на місцевості та її координатної прив'язки з урахуванням особливосте її експлуатації)*

21. Осадчук О.В, Звягін О.С., Савицький А.Ю., Осадчук Я.О., **Воловик А.Ю.**, Червак О.П. Вимірювач газу: патент 137309 Україна на корисну модель. № u 201904300 ; заявл. 22.04.2019 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 4 с. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження властивостей запропонованого сенсору концентрації газу та статистична верифікація стабільності параметрів отриманого пристрою)*

22. Осадчук О.В, Осадчук В.С., Савицький А.Ю., Осадчук Я.О., **Воловик А.Ю.** Пристрій для вимірювання тиску: патент 130737 Україна на корисну модель. № u201806229 ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 4 с. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження властивостей запропонованого сенсору повітряного тиску та статистична верифікація стабільності параметрів отриманого пристрою)*

23. Осадчук О.В, Звягін О.С., Савицький А.Ю., Осадчук Я.О., Лукін В.В., **Воловик А.Ю.**, Червак О.П. Пристрій для вимірювання тиску: патент 129825 Україна на корисну модель. № u201806234 ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21. 4 с. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження властивостей запропонованого сенсору повітряного тиску та статистична верифікація стабільності параметрів отриманого пристрою по результатам яких, виконана корекція параметрів запропонованої схеми)*

24. Осадчук О.В, Звягін О.С., Савицький А.Ю., Осадчук Я.О., Лукін В.В., **Воловик А.Ю.**, Червак О.П. Пристрій для вимірювання тиску: патент 129824 Україна на корисну модель. № u201806226 ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 12.11.2018, Бюл. № 21. 4 с. *(Здобувачем проведено експериментальне дослідження властивостей запропонованого сенсору повітряного тиску та статистична верифікація стабільності параметрів отриманого пристрою)*

Монографії у співавторстві:

25. Кичак В.М., Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.** Методи та пристрої обробки радіосигналів бортових авіаційних систем посадки : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 208с. *(Здобувачем виконаний аналіз резервів підвищення точності і достовірності кутових вимірювань у радіо технічних засобах систем посадки повітряних суден, розроблено ряд методів синтезу пристроїв фільтрації стійких до порушень працездатності радіотехнічних засобів, проведено основні експериментальні дослідження)*

26. Havrilov D., **Volovyk A.**, Koval L., Yarovyi D. Radio engineering frequency meter based on microcontroller for biomedical measurement systems. *Theoretical aspects of modern engineering : [coll.] monograph. Boston: Primedia eLaunch. 2020. P. 246–250. DOI- 10.46299/ISG.2020. MONO.TECH.III* *(Здобувачем виконано математичний синтез алгоритму роботи цифрового вимірювального пристрою)*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.**, Шутило М.А., Червак О.П. Підвищення роздільної здатності азимутального каналу авіаційної системи посадки. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали XIV міжнародної конференції, 5–10 червня 2015 р., Одеса, 2015. С. 63-64. (Здобувач запропонував метод покращення роздільної здатності азимутального кутомірного каналу шляхом синтезу оптимального фільтра укорочення)

28. Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.**, Шутило М.А., Червак О.П. Оцінка функціональної надійності фазового каналу синхронізації у системі посадки сантиметрового діапазону. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції РТПСАС 2015, 16–22 березня 2015 р., Київ, 2015. С. 163-165. (Здобувач виконав експериментальне дослідження якості роботи цифрової ФАПЧ з метою визначення ймовірності появи аномальних похибок вимірювань кутових координат повітряного судна)

29. Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.**, Шутило М.А., Червак О.П. Синтез активних РС-фільтрів за наявності обмежень на характеристики згасання та робочої фази. «*Informatics and computer technics problems* : Proceedings of the Third International Conference, 27–30 May 2014 р., Chernivtsi, 2014. С. 147-148. (Здобувачем виконано синтез оптимальної передаточної функції фільтру та аналіз отриманх результатів)

30. Воловик Ю.М., **Воловик А.Ю.**, Шутило М.А., Червак О.П. Аналіз впливу нестабільності коефіцієнтів підсилення операційних підсилювачів на характеристики активних РС-фільтрів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали XIII міжнародної конференції, 6–12 червня 2014 р., Одеса, 2014. С. 147–148. (Здобувачем отриманий вираз для частотного коефіцієнта передачі багато каскадного активного фільтра та залежність його добротності від коефіцієнта підсилення активного елемента).

31. **Воловик А. Ю.**, Шутило М. А., Червак О. П. Дискретна фільтрація сигналів за наявності епізодичних змін їх параметрів. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції РТПСАС 2016, 14–20 березня 2016 р., Київ, 2016. С. 20 -22. (Здобувачем виконаний синтез дискретного оптимального фільтра, а задача оцінки вектора стану об'єкту контролю вирішена на основі тесту узагальненої правдоподібності)

32. **Воловик А. Ю.** Синтез відновника вектора стану динамічної системи за наявності неконтрольованих збурень. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції РТПСАС 2017, 20–26 березня 2017 р., Київ, 2017. С. 41-43. (Здобувачем виконаний математичний синтез відновника вектора стану динамічної системи за наявності неконтрольованих збурень, доказані необхідні умови його існування)

33. **Воловик А.Ю.**, Шутило М. А., Червак О. П. Формувач різницевого сигналу модельно-орієнтованих систем діагностики. *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування* : Матеріали VI міжнародної конференції, 28–30 березня 2017 р., Вінниця, 2017. С. 31–32. (Здобувачем, у рамках су-

часної модельно-орієнтованої концепції, запропонована структура формувача різницевого сигналу)

34. Осадчук О.В., **Воловик А.Ю.**, Осадчук Я.О., Червак О.П. Mathematical modeling of generator parameters based on transistor structure with negative resistance. *Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях* : Матеріали VI міжнародної конференції. 9–11 листопада 2017, Чернівці. С. 77–78. (Здобувачем запропоновано метод апроксимації нелінійної вольт-амперної характеристики активного елемента генератора)

35. **Воловик А.Ю.**, Осадчук О.В., Шутило М.А., Червак О.П. Ідентифікація, несправностей, що зароджуються методом роздільного оцінювання. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали XVIII міжнародної конференції. 8–13 червня 2018 р., Одеса. С. 92-94. (Здобувачем запропоновано метод декомпозиції розширеного фільтра Калмана)

36. **Воловик А.Ю.**, Мозговий В.С. Оцінка обчислювальних ресурсів алгоритму дискретної оптимальної фільтрації. *Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки, та наносистем* : Матеріали I міжнародної науково-технічної конференції. 14–16 листопада 2019, Вінниця. С. 96–98. (Здобувачем запропоновано методика оцінки обчислювальної ефективності пристроїв оптимальної фільтрації)

37. **Volovik A.**, Semenov A., Havrilov D., Baraban S., Savytskyi A., Zviahin O. Observation Trajectory Model for Radio-Frequency Aviation Landing Systems. *The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019)* : 09–13 September 2019 p., Odessa, Ukraine, 2019. P. 1-5. doi: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165505. (Індексується Scopus). (Здобувачем розроблено метод синтезу пристрою фільтрації стійкого до порушень працездатності кутомірною каналу системи посадки сантиметрового діапазону, отримані основні експериментальні результати;)

38. Havrilov D., Baraban S., **Volovyk A.**, Zviahin O., Semenov A., Savytskyi A.. Real-Time Video Processing System based on Field Programmable Gate Array. *IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* : 09–13 September 2019 p., Lviv, Ukraine, 2019. P. 192-196. doi:10.1109/STC-CSIT.2019.8929758. (Індексується Scopus)ю (Здобувачем запропоновано алгоритм шумової фільтрації сигналу відеоконвертора)

39. **Воловик А.Ю.** Теоретичні основи стохастичних діагностичних відновників. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали ювілейної міжнародної науково-технічної конференції, 6–29 червня 2020 р., Одеса, 2020. С. 42-44. (Здобувачем синтезовано пристрій сумісного оцінювання вектору стану нестационарної лінійної системи та несправностей в присутності шумів і збурень, обумовлених дестабілізуючими факторами невизначеної структури, надані рекомендації щодо умов використання синтезованого пристрою)

40. **Воловик А.Ю.** Формування різницевого сигналу в модельно-орієнтованих системах діагностики. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції РТПСАС 2020, 16-22 листопада 2020р., Київ, 2020. С.18-20. (Здобувачем виконано синтез пристрою

оцінювання вектору стану стаціонарної лінійної системи на основі повноформатного спостерігача Луенбергера)

41. **Воловик А.Ю.** Базові визначення модельно-орієнтованих діагностичних систем. *Science, society, education: topical issues and development prospects* : 10–12 May 2020, Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 228-233. (Здобувачем визначені основи термінології щодо модельно-орієнтованих діагностичних систем)

42. Havrilov D., **Volovik A.**, Yarovyi A., Yarovyi D., Kudriavtsev D. Hardware Implementation of SHA Algorithms on Different FPGA and Speed Comparison. *IEEE IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)* : 21–25 September 2020, Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 453-457. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252678. (Scopus) (Здобувачем розроблена апаратна реалізація запропонованого алгоритму функції згортки)

43. **Воловик А.Ю.** Difference signal shapers stability of the model oriented diagnostic systems. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали XXI міжнародної конференції. 3–7 червня 2021 р., Одеса, 2021. С. 17-19. (Здобувачем визначені критерії стійкості формувачів різницевого сигналу)

44. **Volovik A.**, Kychak V., Kudriavtsev D., Havrilov D., Yarovyi A., Krylik L. Simultaneous Estimation in Linear Dynamic Systems with the Indeterminate Structure Disturbances. *IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* : 8 May 2020, Kyiv, Ukraine, 2020. P. 651-655. doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088884. (Scopus). (Здобувачем синтезовано пристрій сумісного виявлення несправності в підсистемах об'єкту контролю та сенсорній підсистемі на фоні присутніх збурень невідомої структури, запропоновано шляхи подолання локальних обмежень запропонованого пристрою)

45. **Воловик А.Ю.** Застосування адаптивних порогів у системах виявлення і локалізації несправностей. *Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки, та наносистем* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. 3–5 листопада 2021 р., Вінниця, 2021. URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/view/13848> (дата звернення 26.09.2022). (Здобувачем визначена залежність стійкості модельно-орієнтованих пристроїв функціональної діагностики від величини адаптивного порогу граничного селектора)

46. **Воловик А.Ю.** Актуальність застосування інформаційних вимірювальних систем функціонально стійкого керування. *Priority directions of science development* : Abstracts of the 5th International scientific and practical conference, 2–3 March 2020, Lviv, Ukraine, 2020. P. 168-173. (Здобувачем визначена актуальність використання систем діагностики на основі модельно-орієнтованої концепції)

47. **Volovyk A.**, Havrilov D., Koval L. Generalized structure of the model-oriented difference signal former. *Specialized and multi-disciplinary scientific researches* : With proceedings of the international scientific and practical conference, December 11 2020, Amsterdam, The Netherland, 2020. Vol. 2, P. 23-26. (Здобувачем запропонована структура формувача залишкового різницевого сигналу)

48. Havrilov D., **Volovyk A.**, Koval L., Semenov A., Havrilova N. Design of Digital Data Selectors on FPGA in a Laboratory Environment. *IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)* :

05-07 October 2021, Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 495-500. doi:10.1109/PICST54195.2021.9772137. (Scopus). *(Здобувачем виконана алгоритмічна реалізація селектора цифрових даних)*

49. **Воловик А.Ю.**, Червак О.П., Шутило М.А. Аналізатор спектру ідеалізованих радіосигналів. *Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки, та наносистем* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 3-5 листопада 2021, Вінниця, 2021. URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/view/13849> (дата звернення 26.09.2023). *(Здобувачем розроблено математичні моделі радіосигналів та визначено алгоритмічну структуру цифрового частотного аналізатора)*

50. Havrilov D., **Volovyk A.**, Semenov A., Koval L., Vasykivskiy M., Havrilova N. Research of Electromagnetic Compatibility of Electronic Automotive Equipment. *IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)* : 19-21 May 2021, Lviv, Ukraine, 2021. P. 170-174. doi: 10.1109/ELIT53502.2021.9501093. (Scopus). *(Здобувачем розроблено алгоритм комплексної оцінки енергетичної складової шуму)*

51. Semenov A., Havrilov D., **Volovyk A.**, Stalchenko O., Kulas R., Ilchuk D. Single-Mode and Multimode Operation of the Rectangular Waveguide with a Spherical Ferrite Probe. *IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* : 26-28 August 2021, Lviv, Ukraine, 2021. P. 100-104. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575750. (Scopus). *(Здобувачем здійснена програмна реалізація розробленої математичної моделі та виконаний аналіз достовірності результатів моделювання)*

52. **Volovyk A.**, Havrilov D., Koval L., Vasykivskiy M., Yarovyi A., Semenov A. Design of Spectrum Analyzer for Radio Signals. *IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)* : 22-26 February 2021, Lviv, Ukraine, 2021. P. 10-14. doi:10.1109/CADSM52681.2021.9385262. (Scopus). *(Здобувачем розроблено математичні моделі радіосигналів, синтезовано алгоритм частотного аналізатора, виконано програмну реалізацію пристрою)*

10. Впровадження результатів наукових досліджень. Наукові та практичні результати проведених досліджень знайшли відображення у держбюджетних науково-дослідних роботах, кафедри інфокомунікаційних систем і технологій та кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету у період з 2014 по 2022 рік.

Подані наукові та практичні результати дисертації застосовуються в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету та використовуються під час викладання дисциплін для студентів та аспірантів за напрямком 172 «Телекомунікації та радіотехніка» та відображені у низці навчальних посібників.

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 техніч-

них 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», що підтверджено відповідними актами впровадження.

11. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на конференціях: The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo'2019 (Odessa, Ukraine 2019); 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO, (Kyiv, Ukraine, 2020); 6th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM, (Lviv, Ukraine, 2021); 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT, (Lviv, Ukraine, 2019); 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET. (Lviv-Slavske, Ukraine. 2020); Ukrainian Microwave Week, UkrMW, (Kharkiv, Ukraine, 2020); 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON, (Lviv, Ukraine, 2021); 8th International Conference on Problems of infocommunications, Science and Technology, PIC S and T (Kharkiv, Ukraine, 2021); 12th International Conference on Electronics and Information Technologies, ELIT (Lviv, Ukraine, 2021,); III МНПК «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» ПІКТ (Чернівці, Україна, 2014); МНТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», ВОТТП (Одеса, Україна, 2014, 2015, 2018, 2020, 2021); МНПК «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях». м.Чернівці (Чернівці, Україна, 2017); Міжнародна науково-технічна конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», РТПСАС (Київ, Україна, 2016, 2017, 2020); Міжнародна конференція «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування», СПРТП (Вінниця, Україна, 2017, 2019); International scientific and practical conference «Specialized and multi-disciplinary scientific researches», (Amsterdam, The Netherland, 2020) December 11, 2020, Amsterdam, The Netherland; МНТК "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем", СПРН, (Вінниця, Україна, 2021)

12. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення. Дисертація викладена професійно, кваліфіковано та грамотно. Матеріали логічно систематизовані та коректно оформленні. 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.)

13. Відповідність принципам академічної доброчесності. У процесі перевірки на академічний плагіат рукопису дисертації Воловика А. Ю. встановлено відповідність електронного варіанту дисертації, наданого здобувачем, паперовому варіанту дисертації. У результаті перевірки дисертації Воловика А. Ю. академічного плагіату не виявлено.

14. Відповідність дисертації паспорту спеціальності, за якою вона представлена до захисту. Робота відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.12.13. – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій, зокрема з напрямків: «Дослідження й розроблення принципів, методів, алгоритмів і структур пристроїв формування, генерування, підсилення, фільтрації, модуляції та демодуляції (детектування), кодування, декодування в системах радіотехніки та телекомунікацій та дослідження й розроблення принципів, методів, алгоритмів, структур пристроїв цифрової обробки сигналів, зокрема багатовимірних, які використовуються в системах радіотехніки та телекомунікацій».

15. Характеристика здобувача, ступінь наукової зрілості. Проведені дослідження та опубліковані наукові праці характеризують Воловика А. Ю. як кваліфікованого фахівця і дослідника з потужним досвідом практичної роботи за спеціальністю. Здобувач на високому рівні володіє методологією наукових досліджень, має безпосередні практичні навички роботи у сфері радіотехніки та телекомунікацій. Йому притаманне логічне мислення, вміння ставити наукові завдання та пропонувати нестандартні шляхи їх вирішення, виділяти основні та вторинні аспекти. Воловик А. Ю. є сформованим, кваліфікованим науковцем з глибоким теоретичним та практичним рівнем підготовки.

ВИСНОВОК

Дисертація Воловика Андрія Юрійовича «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, виконаною здобувачем самостійно, у якій розв'язано актуальну науково-технічну проблему, що полягає у розробленні 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.

У 52 наукових публікаціях повністю відображені результати дисертації, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, які входять до міжнародних наукометричних баз Scopus або/та Web of Science, 13 статей у наукових фахових виданнях України; 2 колективні монографії, 26 матеріалів і тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях, 5 патентів на корисну модель.

Дисертація підготовлена за спеціальністю 05.12.13. – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій, відповідає паспорту спеціальності 05.12.13. – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057), та вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197.

З урахуванням актуальності теми дослідження, наукової новизни, теоретичного та практичного значення одержаних результатів, впровадження їх у практику, обґрунтованості висновків на основі одержаних достовірних результатів, особистому внеску здобувача у розв'язання важливої науково-технічної проблеми, достатньої повноти викладення матеріалів дисертації, що характеризується єдністю змісту, відповідності принципам академічної доброчесності, а також беручи до уваги наукову зрілість та професійні якості Воловика Андрія Юрійовича, рекомендувати дисертацію «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13. – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Рецензенти:

Професор кафедри теоретичної
радіотехніки та радіовимірювань
Національного університету
«Львівська політехніка»,
д.т.н., професор

 Андрій БОНДАРЕВ

Професор кафедри технічної
кібернетики й інформаційних
технологій Одеський національний
морський університет
д.т.н., професор

 Олексій ПОЛІКАРОВСЬКИЙ

Професор кафедри інфокомунікаційних
систем і технологій
Вінницького національного
технічного університету
д.т.н., доцент

 Дмитро МИХАЛЕВСЬКИЙ

" 19 " 06 2023р.