

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора, професора кафедри «Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій» Хмельницького національного університету Бойко Юлія Миколайовича на дисертаційну роботу Воловика Андрія Юрійовича «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю», яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 - радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

### **Актуальність теми дисертації.**

Сучасний світ перенасичений технологічно-складними комплексами і системами різноманітного призначення. Науково-технічний прогрес значно покращує рівень людського життя з одного боку і підвищує ризик виникнення аварій і катастроф з іншого. Збільшення вірогідності виникнення техногенних аварій підштовхує людство все більше уваги приділяти питанням забезпечення заданого ступеню безпеки в потенційно небезпечних галузях промисловості та безаварійної експлуатації потенційно небезпечних об'єктів і систем. Попит сучасного суспільства на високонадійні технічні системи постійно зростає.

Для радіотехнічних та телекомунікаційних систем, що є часткою глобальних систем технічної безпеки, основним методом підвищення безаварійності експлуатації є забезпечення необхідного рівня їх надійності. При цьому потрібно зауважити, що концепція структурної (апаратної) надлишковості, на сьогодні, досі залишається пріоритетним напрямком підтримання надійності відповідного радіоелектронного обладнання та діагностики його несправностей. З іншої сторони, тенденції розвитку світової науки, у цьому напрямку, демонструють, що для технологічно-складних і високо-інтегрованих систем більш доцільним вважається використання аналітичної надлишковості, а саме, спільних вимірів різнотипних фізичних величин з подальшим перехресним контролем. Джерелом еталонної інформації, у даному випадку, виступає математична модель контрольованого об'єкта. Такий підхід забезпечує зменшення виробничих та фінансових витрат і збільшує технічну ефективність експлуатації технологічного об'єкту у цілому.

Авіаційна індустрія не є винятком з вище занотованих стверджень. Одночасно з появою авіації виникла проблема забезпечення безпеки авіаперельотів.

Радіотехнічні системи посадки гарантують необхідний рівень авіаційної безпеки на найбільш відповідальному і складному етапі польоту – посадці повітряного судна. Процес керування посадкою повинен здійснюватись виключно на основі високоточної та достовірної інформації. З метою своєчасного виявлення несправностей, виникає потреба у розробці методів та пристроїв формування діагностичних ознак, що характеризують поточний стан кутомірною каналу системи посадки у реальному часі і порівняння їх з основними показниками якості його функціонування.

У підсумку, враховуючи вище наведене можна стверджувати, що наукове дослідження направлене на подолання протиріччя між потребою у підвищенні точності, оперативності та достовірності діагностичної інформації стосовно радіотехнічних систем посадки повітряних суден та відсутністю теоретичних знань щодо принципів та закономірностей формування діагностичних ознак, що характеризують якість функціонування таких систем є безперечно актуальним.

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

У сукупності одержані у роботі теоретичні результати відкривають перспективи науково обґрунтованого вирішення широкого кола прикладних задач, пов'язаних з синтезом пристроїв обробки інформативних сигналів у радіотехнічних системах за для підвищення їх функціональної надійності. Відповідно до мети дослідження у роботі одержані такі основні нові наукові результати:

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

2. Вперше 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;

3. Вперше 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;

4. Подальшого розвитку набули основи теорії синтезу пристроїв відновлення вектору стану лінійних динамічних систем, інваріантних щодо дії несправностей у каналі спостережень, що передбачає можливість отримання, у

рамках байєсової методології, оптимального пристрою відновлення повного порядку у вигляді паралельно діючої структури з  $N$  модельно-умовних фільтрів Калмана;

5. 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 або(та) алгоритмічних спрощень.

6. Вперше запропонована науково обґрунтована методологія синтезу умовно—оптимального розщепленого фільтра Фрідланда, виходи якого еквівалентні виходам розширеного фільтра Калмана за умови дотримання певних обмежень. Приведена методологія відрізняється відмовою від принципу автономності складових розщепленого фільтра та охоплені їх системою перехресних зв'язків та уведенням одноканального зсуву часових шкал для розщеплених фільтрів;

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

8. 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;

9. 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;

10. Подальшого розвитку набув метод виявлення множинних несправностей у підсистемах об'єкта контролю та їх роздільного оцінювання у рамках геометричного підходу в якому запровадженна процедура примусової класифікації за допомогою спеціально утвореного індексу виявлення несправностей, функціонально зв'язаного з сигнатурою несправностей.;

11. 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 зі схемою виявлення несправностей на основі статистичного тесту узагальненого відношення правдоподібності, який використовує оцінки невідомих параметрів за критерієм максимуму правдоподібності.

12. Запропоновано альтернативний метод виводу рівнянь для фільтра Калмана з статистично-невизначеними входами, який базується на означенні функціонального відновника у формі О'Рейлі – Луенбергера, що дає можливість відносно просто контролювати збіжність процесу фільтрації та його оптимальність.

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

Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 284 найменувань і 3 додатків на 29 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 464 сторінках, у тому числі – 340 сторінки основного тексту. Дисертація містить 91 рисунок і 10 таблиць.

У дисертаційній роботі викладені наукові положення, висновки та рекомендації в достатній мірі обґрунтовані та в більшості підтверджені експериментально.

У вступі показана актуальність роботи; дисертант посилається на відомих зарубіжних і вітчизняних вчених, які займалися проблемою, що досліджується у роботі; визначено наукову новизну та практичну значущість роботи; показано апробацію роботи; наведено список публікацій дисертанта.

У першому розділі проведено систематичний аналіз базових принципів побудови модельно-орієнтованих систем функціональної діагностики; проаналізовані методи формування різницевого сигналу; розглянуті питання діагностики несправностей у стохастичних системах; виконаний порівняльний аналіз модельно-орієнтованих методів функціональної діагностики, визначений перелік основних задач, що підлягатимуть розв'язку.

У другому розділі розглянуті теоретичні основи модельно-орієнтованих діагностичних відновників; виконаний аналіз можливих варіантів побудови відновників повного порядку; значна увага приділена синтезу оптимальних відновників у рекурентній формі методом зважених найменших квадратів; встановлено, що оптимальні пристрої відновлення синтезовані на основі інших критеріїв якості мають аналогічну структуру; запропонована структура пристрою відновлення повного порядку з невизначеними входами, встановлені та доказані умови його існування.

Третій розділ присвячені розробці моделей та методів синтезу стохастичних пристроїв відновлення вектора стану динамічних систем, що мають підвищену стійкість до несправностей у сенсорній підсистемі; виконаний синтез оптимального фільтра, стійкого до статистично незалежних несправностей у каналі спостережень; виконано синтез низки робастних пристроїв оцінювання за наявності аномальних похибок у каналі спостережень; розроблений методу подолання апріорної невизначеності щодо ймовірностей появи аномальних викидів у каналі спостережень.

Четвертий розділ присвячений розробці методів виявлення та локалізації несправностей за умови апріорної невизначеності; розглянута задача діагностики несправностей у сенсорній підсистемі при виконанні комплексних спостережень; вирішена задача діагностики несправностей у підсистемах регулятора на основі застосування системи виявляючі фільтрів; запропонований альтернативний варіант побудови фільтра Калмана з невизначеним входом.

П'ятий розділ присвячений розробці методів ідентифікація несправностей методами локально оптимального роздільного оцінювання; розглядається низка задач сукупного оцінювання станів лінійних стохастичних систем та супутніх несправностей за наявності збурень, структура яких вважається невизначеною; виконано синтез фільтра спроможного виявляти несправності та виконувати їх локалізацію за умови відсутності супутніх збурень на основі геометричного підходу; розроблено ряд методів для синтезу фільтрів роздільного оцінювання несправностей та вектора стану системи, що засновані на концепціях Кітанідіса та Фрідланда.

У шостому розділі вирішені практичні задачі функціонального захисту від порушень працездатності на прикладі радіотехнічної системи посадки сантиметрового діапазону; побудована номінальна математична модель динаміки зміни кута місця ПС 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; були досліджені характеристики точності оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна на етапі вирівнювання для трьох базових структур, а саме стандартного фільтра Калмана, модифікованого фільтра Кітанідіса та модифікованого фільтра Фрідланда; для задач практичного оцінювання 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» досліджені характеристики точності оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна для двох різновидів робастних структур, побудованих на основі модифікованих фільтрів Фрідланда та Кітанідіса.

У висновках сформульовано основні результати проведених досліджень, а у додатках містяться основи термінології у галузі функціональної діагностики, частина результатів моделювання, акти впровадження результатів роботи та список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

### **Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання.**

У дисертаційній роботі широко подані висновки на основі формули «теорія-практика». Такий підхід зорієнтований на полегшення розуміння взаємозв'язку між теоретичними положеннями модельно-орієнтованих функціональних систем діагностики та можливими варіантами їх практичної реалізації. Це може бути використано для подальшого теоретичного підтвердження запропонованої в роботі концепції або експериментального дослідження в реальних практичних додатках. Основні теоретичні положення дослідження є корисними і дозволяють розширити набір методів запропонованого в роботі наукового підходу, що в свою чергу, дозволить суттєво розширити область його застосування для стохастичних динамічних системах неперервного або дискретного часу.

Отримані в дисертаційній роботі наукові та практичні результати також можуть знайти подальше застосування у зв'язку з тим що:

- проблема функціонального захисту радіоелектронних та телекомунікаційних систем від можливих порушень працездатності носить комплексно системний характер і актуальна на усіх етапах життєвого циклу системи від її проектування до утилізації. Результати виконаних досліджень представлені у формалізованій та добре структурованій формі, зручній для реалізації засобами обчислювальної техніки у вигляді відповідних програмно-орієнтованих пакетів. Тому вони можуть знайти попит у проектних організаціях, конструкторських бюро, науково-дослідних інституціях пов'язаних з розробкою зразків нової високонадійної техніки на основі використання САПР.

- нова філософія проектування відмовостійких технічних систем потребує відповідної кваліфікації кадрів, то логічно що до наступної категорії споживачів результатів досліджень слід віднести інститути підвищення кваліфікації, перепідготовки інженерно-технічних кадрів та особливо заклади вищої освіти.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення ефективності засобів функціональної діагностики радіотехнічних та радіоелектронних систем різноманітного призначення на об'єктах ДП «Укрерорух», «Аеропорт Вінниця»; у військовій частині що належить до підрозділів метрологічного забезпечення авіації об'єднаного центру метрологічного забезпечення Збройних Сил України; в рамках новітніх розробок на державному підприємстві «Новатор»; з метою організації навчального процесу у Він-



ницькому національному технічному університеті. Це підтверджується наведеними актами впровадження результатів дисертаційних досліджень.

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

Обґрунтованість та достовірність отриманих в ході дисертаційного дослідження нових наукових положень, методів, висновків та практичних результатів, впливають з наступного:

- теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях теорії функціональних відновників О'Рейлі та Луенбергера та теорії оптимальної дискретної фільтрації за Калманом, теоретичних постулатах векторно-матричної алгебри, основних положень теорії статистичних рішень, використанням методів зважених найменших квадратів або елементів варіаційного числення, коректним і обґрунтованим вибором математичних моделей сенсорних систем та відповідних завад, обґрунтованим вибором припущень і обмежень під час формулювання і постановки розв'язуваних наукових задач, точністю доказів теоретичних висновків,

- достовірність нових, отриманих автором результатів, підтверджується розрахунками, експериментальним дослідженням, електронним моделюванням на основі апріорних даних отриманих за допомогою напівнатурного експерименту та відповідним контролем коректності системи припущень у процесі статистичного моделювання за методом Монте-Карло;

- отримані теоретичні матеріали добре узгоджуються з відомими фактами та не суперечать теорії;

- основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були висвітлені та апробовані на науково-практичних конференціях і семінарах;

- практичними результатами, які відображені в актах впровадження та патентах.

Отримані здобувачем результати і висновки логічні, мають високий ступінь обґрунтованості, та не викликають сумніву.

### **Повнота викладення в опублікованих працях отриманих у роботі результатів.**

Повнота викладу наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційному дослідженні, підтверджується апробацією матеріалу в публікаціях у фахових вітчизняних та іноземних виданнях, їх оприлюдненням на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях. Тематична спрямованість наукових конференцій та семінарів відповідають напрямкам досліджень представленої дисертаційної роботи. Характер статей здобувача, в яких

відображено наукові положення дисертації і результати проведених досліджень, повного мірою розкривають дослідницьку задачу.

Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 52 наукових працях, з яких 10 одноосібних. Серед опублікованих праць 2 монографії; 6 статей у журналах що індексуються в наукометричних базах, серед яких 4 у закордонних періодичних виданнях, 1 стаття у фаховому виданні України категорії А, що входить до наукометричних баз Web of Science, 1 стаття у фаховому виданні України категорії В, що входить до наукометричних баз Scopus; 13 – статей у наукових фахових виданнях України категорії Б; 26 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, а також 5 патентів України на корисну модель.

Дисертація пройшла належну апробацію, є самостійною науковою працею, що має завершений характер.

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

Дисертаційна робота Воловика А.Ю., яка виконана на тему «Моделно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю», за оформленням відповідає 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.).

Стиль викладу матеріалів дисертаційної роботи забезпечує доступність їх сприйняття. Дисертація написана сучасною науково-технічною мовою, послідовно, логічно і грамотно.

Мета, наукова і практична новизна, коротка характеристика розділів, висновки, список опублікованих за темою дисертації робіт, особистий внесок здобувача, які викладено в авторефераті, повністю відповідають змісту дисертаційної роботи, автореферат є ідентичним основним положенням дисертації.

### **Загальні зауваження.**

1. На теперішній час перспективним напрямком розвитку є впровадження концепції штучного інтелекту в різноманітні сфери людського життя. Не винятком з цього є і галузь електроніки, автоматизації та електронних комунікацій. В розділі 1.4 при проведенні аналізу існуючих методів виявлення та локалізації несправностей, на мій погляд, автором не приділено достатньої уваги існуючим аспектам побудови діагностичних систем на основі штучного інтелекту їх особливостям, перевагам та відмінностям від традиційних методів технічної діагностики.



2. У підрозділі 1.10 розглядаються критерії локалізації несправностей за наявності сформованої множини різницевих сигналів, що містять інформаційну складову про функціональну нестабільність технічних параметрів об'єкту контролю в рамках наведених припущень. З наведених пояснень не зовсім зрозумілими є відмінності, особливості та обмеженість застосування двох запропонованих структур які дозволяють розпізнати характер несправностей, це множина структурованих сигналів та множина сигналів орієнтованих за напрямком.

3. У другому розділі (підрозділ. 2.4) дисертаційної роботі наведені означення відновлюваності та виявлюваності лінійних дискретних систем з відповідними доказами умов існування цих критеріїв. За допомогою формули (2.45) автор уводить поняття канонічної форми відновлюваності лінійної системи. Неясною є мета розгляду питання канонічності та ствердження її особливої зручності для виявлення властивості відновлюваності цієї форми представлення.

4. Існує досить багато критеріїв ймовірнісної оцінки ступеня оптимальності того чи іншого процесу. Виникає питання чому в підрозділі 2.6 автор обмежився тільки детальним розглядом методу найменших квадратів.

5. Протягом проведення досліджень автором періодично підкреслюється, що розроблені ті чи інші методи локалізації несправностей зберігають свою функціональність у разі поодинокі несправності. Постає цілком логічне, просте питання, можливо чи ні, за допомогою модельно орієнтованих методів технічної діагностики локалізувати одночасні або багатократні несправності.

6. Не зовсім зрозумілим з якої саме причини при розгляді оптимальних стохастичних пристроїв відновлення для дискретних систем з невизначеними збуреннями та шумом у процедурі декомпозиції стохастичного відновника (4.68), (4.69) (стор. 233) з'являється процедура псевдо інверсії.

7. Потребує глибшого пояснення вживаний у дослідженні термін «мінімальна можливість протистояння впливу несправностей» (стор. 233) оскільки, в даному випадку, природним є досягнення як найкращого ступеня захисту, тобто максимального.

8. У якості еталонної математичної моделі у розділі 6 запропонована модель руху повітряного судна четвертого порядку. У (підрозділ 6.5.2) наведенні міркування на її користь, досить ретельно розглянуті питання лінеаризації. При цьому не достатньо зрозуміло, чому при оцінюванні ефективності методів фільтрації стійких до порушень працездатності сенсорної підсистеми (підрозділ 6.6) та ідентифікації несправностей у підсистемах керування польотом (підрозділ 6.7) автором були використані різні змінні стану для опису одного і того ж об'єкту контролю.

9. Основним методом аналізу отриманих у роботі алгоритмів обробки спеціальних сигналів-носіїв діагностичної інформації є метод математичного

статистичного моделювання, коректність системи припущень якого потребує прискіпливого контролю. С цього питання автором у підрозділі 6.6.1 були наведені потрібні обґрунтування. Однак це питання потребує додаткових роз'яснень у дослідженнях проведених у підрозділі 6.7, оскільки апріорні умови проведення тестування мають явну відмінність.

В цілому зазначені зауваження не стосуються основної суті дисертаційної роботи і не впливають, на поданих в ній, наукову цінність та новизну. Поставлена у дослідженні мета досягнута, основні завдання успішно вирішені. Освітлені зауваження є дискусійними та спрямовані на привернення уваги дисертанта до ще не досліджених аспектів наукової проблеми.

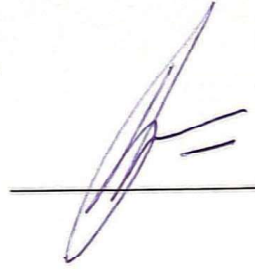
### **Висновки**

Дисертаційна робота Воловика Андрія Юрійовича, яка виконана на тему «Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю» містить в собі наукові положення, висновки та рекомендації, що мають достатнє теоретичне та методологічне обґрунтування. Тема дисертації є актуальною, її структура є добре продуманою, а матеріал викладений логічно та послідовно. Отримані в роботі наукові результати в сукупності розв'язують важливу наукову проблему і мають практичну цінність. Робота виконана на високому теоретико-методологічному рівні, є цілісною та завершеною. За змістом повністю відповідає вимогам «Паспорту» спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Представлена до захисту дисертаційна робота Воловика А. Ю. є самостійним і оригінальним науковим дослідженням, яке містить раніше не захищені наукові положення, нові науково обґрунтовані результати отримані автором в галузі технічних наук.

Таким чином, за актуальністю, структурою, повнотою викладу матеріалу, аргументацією основних положень, новизною отриманих результатів дослідження дисертаційна робота відповідає вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме 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 присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 — радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри «Телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних  
технологій» Хмельницького  
національного університету



Юлій БОЙКО

Підпис професора Бойко Ю.М.

ЗАСВІДЧУЮ

Проректор з наукової роботи  
Хмельницького національного  
університету, д.т.н., професор

«28» \_\_\_\_\_ 07 2024 року



Олег СИНЮК