

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**ВОЛОВИК АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ**

УДК 621.396.96

**МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ  
В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ З ПІДВИЩЕНОЮ  
ФУНКЦІОНАЛЬНОЮ НАДІЙНІСТЮ**

05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**ЛЬВІВ – 2024**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** Заслужений працівник освіти України,  
доктор технічних наук, професор  
**КИЧАК Василь Мартинович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і  
технологій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ПОЛІТАНСЬКИЙ Руслан Леонідович**,  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича,  
професор кафедри радіотехніки та  
інформаційної безпеки;

доктор технічних наук, професор  
**БОЙКО Юлій Миколайович**,  
Хмельницький національний університет,  
професор кафедри телекомунікацій, медійних та  
інтелектуальних технологій;

доктор технічних наук, професор  
**ДРУЖИНІН Володимир Анатолійович**,  
Київський національний університет  
ім. Тараса Шевченка, в.о. завідувача кафедри  
інформаційних системи і технології.

Захист відбудеться « 14 » червня 2024р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 2, аудиторія 218.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).  
Реферат розісланий « 13 » травня 2024 р.

*Вчений секретар*  
*спеціалізованої вченої ради*  
Д 35.052.10  
доктор технічних наук, доцент

Микола БЕШЛЕЙ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасне суспільство при реалізації великомасштабних технічних проєктів зіткнулося з проблемою забезпечення належного рівня надійності та гарантування заданого ступеню безпеки. У першу чергу це стосувалось таких пріоритетних областей діяльності, як: авіаційна, оборонна, космічна, енергетична та ін. Характерною рисою систем зазначеної групи є висока технологічна конвергенція, значна вартість, наявність екстремальних умов та потенційна небезпека у процесі їх експлуатації. Традиційні методи забезпечення безпеки функціонування систем реального часу ґрунтуються на багатократному апаратному резервуванні та введенні систем вбудованого контролю, що як правило, супроводжуються підвищенням вартості резервного обладнання, експлуатаційних витрат на технічне обслуговування, збільшенням маси, габаритів, і не завжди дають бажаного ефекту по тій причині, що численні резервні складові самі стають додатковими джерелами відмов та несправностей. Таким чином штучне введення додаткової надмірності на фізичному рівні, за умови виявленого протиріччя, стає стримуючим фактором на шляху побудови високонадійних технічних систем. Сучасні тенденції розвитку керування, стійкого до несправностей, демонструють, 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. Перевірка на сумісність даних у складних динамічних системах здійснюється шляхом порівняння результатів спостережень вихідних сигналів та їх оцінок, отриманих за допомогою кількісних математичних моделей та формуванням, у свою чергу, спеціальних сигналів, які набувають інформаційної складової з метою подальшого виявлення, локалізації та ідентифікації несправностей. Головна перевага цієї концепції полягає у відсутності необхідності встановлення додаткового обладнання, а значить і не має додаткових джерел несправностей. У зв'язку із цим вона є більш економічно привабливою та у разі потреби може ефективно доповнювати існуючу концепцію фізичної надлишковості без здійснення кардинальної технологічної модернізації. Показовим у цьому плані є процес посадки повітряних суден (ПС) в умовах I–III категорій ICAO за допомогою інструментальних посадкових систем, зокрема сантиметрового діапазону. Тут органічно komponуються загально прийняті стандарти комфортності з надзвичайно високими вимогами до гарантій безпеки, а саме ймовірність льотної пригоди повинна бути не більшою за  $10^{-7}$  у поєднанні з технічним обладнанням та устаткуванням обмеженої кратності резервування, що мають суттєву фінансову складову. У переважній більшості випадків посадка ПС здійснюється за наявності таких несприятливих умов як: високий рівень електромагнітних перешкод; необхідності виконання з великою точністю складних передпосадкових маневрів протягом обмеженого проміжку часу; обмеженої кількості резервного обладнання та наявності ускладнених погодних умов. У таких випадках неминучість появи несправностей, короткочасних відмов, збоїв у роботі окремих підсистем, пропусків або аномальних похибок у результатах спостережень стає об'єктивною реальністю. Проте, незважаючи на усі негаразди, процес ке-

рування посадкою ПС повинен здійснюватись виключно на основі високоточної та достовірної інформації. Існуюча на сьогоднішній день, розрізнена множина методів з цього напрямку дозволяє вирішувати окремі задачі виявлення, локалізації та ідентифікації несправностей з різних точок зору, але при цьому досі залишається відсутнім їх строго наукове теоретичне обґрунтування. Зазначений стан речей породжує *протиріччя* між потребою у підвищенні точності, оперативності та достовірності діагностичної інформації стосовно радіотехнічних систем посадки ПС, гарантуванні їх ефективності, зокрема високої функціональної надійності, зменшенні часових, виробничих, фінансових витрат, з однієї сторони, та відсутністю теоретичних знань щодо принципів та закономірностей формування діагностичних ознак, що характеризують функціональні зв'язки з основними показниками якості функціонування таких систем, з іншої сторони. Для подолання виявленого протиріччя постає потреба у розробці на системній основі нових та вдосконаленні відомих методів, пристроїв та алгоритмів формування сигналів-носіїв діагностичних 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, і це породжує актуальну *науково-технічну проблему*, яка вирішується в цій дисертаційній роботі.

Аналіз виконаних з цього напрямку наукових досліджень показує, що він активно розвивається уже майже четверть століття завдяки постійно зростаючому попиту суспільства на високонадійні технічні системи, які задовольняють сучасним вимогам безпеки експлуатації. Окремі, розрізнені дослідження з цієї тематики уже формуються у загально визнаний науковий напрямок, зародилася нова філософія та методологія, з'явилися численні наукові центри та школи. На думку автора, найбільш відомими з них є: наукові школи професорів Р.М. Frank і X. Ding, (ФРН); R.J. Patton та його учнів (Великобританія); роботи професорів A.S. Willsky, R.V. Beard, H. L. Jones, а також роботи R.N. Clark (США); M. Basseville та A. Benvensite (Франція); наукові школи професорів Азарскова В.М., Корніл'єва Є.А., Машкова О.А., Кулика А.С., Жук С.Я., Кичака В.М. (Україна). Одним з додаткових показників актуальності та перспективності обраного наукового напрямку є число доповідей та публікацій, зроблених на спеціальних сесіях міжнародних конференцій та конгресів IFAC SAFEPROCESS по безпеці промислових процесів, міжнародних конференціях з питань нейронних мереж, нечітких множин та штучного інтелекту. Усе це підтверджує правильність обраного наукового напрямку, його актуальність та перспективність.

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

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

**Мета та завдання дослідження.** Мета роботи направлена на підвищення ефективності засобів функціональної діагностики радіотехнічних систем за рахунок розробки та реалізації високоточних, оперативно динамічних модельно-орієнтованих методів обробки інформаційних сигналів на системній основі з використанням сучасних ІТ- технологій, які у поєднанні з комплексом додаткових заходів здатні гарантувати регламентовані показники надійності, точності та стійкості радіонавігаційного обладнання посадкової системи до широкого класу можливих порушень працездатності. Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень необхідно розв'язати таку низку завдань:

- обґрунтувати робочу гіпотезу, згідно якої переважну більшість прикладних задач функціональної діагностики систем реального часу можна розв'язувати залишаючись у межах концепції модельно-орієнтованих відновників, що використовують математичні моделі кількісного типу.

- сформулювати науковий підхід, що дозволив би у межах висунутої робочої гіпотези зосередитись не стільки на добре досліджених фільтрах Калмана (ФК) та функціональних відновниках О'Рейлі-Луенбергера, скільки на їх реконфігурації, використовуючи останні у якості основного інструментарію для дослідження таких специфічних задач, як виявлення, локалізація та ідентифікація несправностей у лінійних системах реального часу.

- запропонувати математичну модель сенсорної підсистеми, яка на відміну від загальновідомої, була б здатна гарантувати опис результатів спостережень різної точності включно з аномальними.

- у межах запропонованої моделі різноточного каналу спостережень розробити методи синтезу пристроїв оцінювання вектора стану досліджуваної системи з різним ступенем складності та ефективності, характерною ознакою яких є стійкість до дії аномальних викидів у окремих результатах спостережень.

- розробити методологію отримання робастних оцінок вектора стану за умови дії аномальних похибок у каналі спостережень, заснованих на принципах структурних або (та) алгоритмічних спрощень оптимального пристрою.

- методом напівнатурних випробовувань перевірити коректність теоретичних припущень щодо ймовірностей втрати працездатності підсистеми спостережень за умови дії низки дестабілізуючих факторів у фазовому каналі радіоприймального тракту посадкової системи сантиметрового діапазону.

– розробити метод синтезу діагностичного відновника стохастичного типу, оптимальність якого гарантується доведенням низки теорем.

– залишаючись у межах геометричного підходу дослідити процедуру роз'єднання множинних несправностей, що діють у підсистемі «об'єкт – регулятор» стаціонарної дискретної динамічної системи, та можливості їх ідентифікації за умови відсутності будь-яких апріорних даних щодо структури вищезгаданих несправностей.

– виконати аналіз існуючих методів розщеплення розширеного фільтра Калмана, результати якого б дозволили виявити та з'ясувати сутність протиріччя між локальною оптимальністю цих структур та умовами збіжності отриманих підсумкових оцінок в залежності від ступеню жорсткості уведених обмежень та окреслити найбільш ймовірні шляхи їх подолання.

– розробити низку пристроїв відновлення, спроможних виконувати задачі функціональної діагностики на фоні збурень різноманітної природи, що мають практичну направленість стосовно їх застосування у радіотехнічних, радіонавігаційних системах та здатних до одночасного виявлення порушень працездатності, як у підсистемі об'єкту контролю так і у каналі спостережень.

*Об'єктом досліджень* є процеси перетворення інформативних сигналів у каналах призначених для спостережень за станом радіотехнічних систем при умові їх різнотипності та дії супутніх неконтрольованих збурень у вигляді похибок моделювання, лінеаризації нелінійних залежностей, штучного заниження порядку моделей, впливу хаотичних імпульсних завад великої потужності, зовнішнього середовища та то що.

*Предметом досліджень* є спеціальні методи обробки інформативних сигналів, які орієнтовані на використання кількісних математичних моделей об'єктів контролю та сприяють підвищенню точності, інформаційної достовірності, надійності оцінок стану радіотехнічних систем з метою гарантування регламентованих показників експлуатаційної безпеки.

*Методи досліджень.* У процесі виконання поставлених задач планується здійснювати опис динамічних процесів (систем) у термінах простору станів з використанням елементів векторно-матричної алгебри, основних положень теорії статистичних рішень, базових понять теорії функціональних відновників О'Рейлі та Луенбергера, теорії оптимальної дискретної фільтрації за Калманом. У разі апріорної невизначеності щодо структури несправностей та супутніх збурень оптимізацію процесу оцінювання передбачається виконувати методом зважених найменших квадратів або з використанням елементів варіаційного числення, зокрема, методу векторних множників Лагранжа.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у подальшому розвитку теоретичних засад побудови математичних моделей динамічних систем з супутніми несправностями та методів синтезу пристроїв обробки інформативних сигналів у радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю.

Зокрема:

*уперше:*

– запропонована науково обґрунтована концепція синтезу пристроїв виявлення несправностей, їх локалізації та ідентифікації у лінійних системах, згідно

якої переважна більшість прикладних задач такого типу може бути успішно розв'язаною в межах теорій модельно-орієнтованих відновників О'Рейлі–Луенбергера та ФК, 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 науковий 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 специфічних задач функціональної діагностики лінійних 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 неперервного або дискретного часу; досягати високої оперативності без потреби встановлення додаткового обладнання, що виключає появу додаткових джерел несправностей;

– 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 (РФК) за умови дотримання певних обмежень. Зазначена методологія ґрунтується на приведенні коваріаційних матриць похибок фільтрації та екстраполяції РФК 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 однотактного 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 і роздільно оцінювати як вектор стану системи, так і вектори присутніх у системі несправностей та збурень.

– 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. 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;

– 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 вектору стану лінійних динамічних систем, інваріантних щодо дії несправностей у каналі спостережень, що передбачає можливість отримання, в межах байєсової методології, оптимального пристрою відновлення повного порядку у вигляді банку модельно-умовних ФК, використання якого дозволяє 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, надані оцінки ефективності та супутніх обчислювальних витрат;

– 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 наукового підходу запропоновано:

– метод синтезу робастного фільтра, у якому завдяки структурним спрощенням з'являється можливість у випадку появи несправностей у сенсорній підсистемі переводити його у режим екстраполяції, не використовуючи при цьому малодостовірні результати спостережень, а у випадку відсутності несправностей здійснити перехід у режим роботи звичайного ФК. При цьому досягається майже двократна економія обчислювального ресурсу за рахунок незначного погіршення точності порівняно з оптимальними оцінками;

– 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 матрич-



ним коефіцієнтом передачі, що актуально для об'єктів зі швидкою динамікою та великою частотою оновлення результатів спостережень;

– метод синтезу лінійного робастного пристрою оцінювання, структура якого базується на заміні блоків обчислення апостеріорних ймовірностей апріорі заданими величинами та використанні лінійної залежності поточних оцінок від результатів спостережень. Результатом стало максимальне спрощення алгоритму фільтрації з точки зору обчислювального ресурсу зі збереженням функціональних можливостей протидії несправностям у каналі спостережень;

– 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 зв'язаного з сигнатурою несправностей спеціально утвореного індексу виявлення несправностей та розщепленням фільтраційного процесу на рівні різницевого сигналу з використанням двох апріорно заданих послідовностей, результатом чого є утворення модифікованого фільтра Калмана, який одночасно оцінює вектор стану системи, вектор прогнозованих на крок уперед спостережень та розмір виявлених несправностей;

– 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.

**Практичне значення одержаних результатів.** Основні, практично значимі, результати дисертаційної роботи отримані на базі проведених теоретичних та експериментальних досліджень. 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 повітряного судна (ПС) у межах регламентованих норм запропоновано спосіб розгортання куткового обладнання на місцевості, який не погіршує тактико-технічні характеристики посадкової системи і в той же час 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 планування ПС розроблено оптимальний пристрій оцінювання з підвищеним ступенем захисту від аномальних похибок у каналі спостережень. Пристрій являє собою паралельно діючу структуру у вигляді банку зважених модельно-умовних оцінок, сформованих відповідними фільтрами Калмана. Процедура формування зважених псевдобайєсових оцінок забезпечила найкращі показники якості з точки зору захисту від впливу аномалій у каналі спостережень, а виграш у точності оцінювання висоти порівняно з стандартним ФК складає близько двох порядків у перехідному режимі і до 10–25 разів в усталеному. Проте, досягнуті показники потребують обчислювальних витрат, що у 2,3–2,5 рази перевищують витрати стандартного фільтра Калмана;

– з метою подолання апріорної невизначеності щодо ймовірностей появ 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, який за відсутності несправностей вироджується у звичайний ФК, а у разі їх появи фільтр переходить у режим екстраполяції без використання результатів аномальних спостережень. Синтезований фільтр здатен забезпечити показники точності оцінювання, що на 30–50% поступають оптимальним. Однак по відношенню до ФК 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 захисту від аномальних похибок у каналі спостережень, де процедура обчислень апостеріорної ймовірності замінена селекторною схемою. Визначено найбільш раціональний варіант ширину селекторного імпульсу  $2\sigma_1(\frac{1}{k-1})$ , який забезпечує показники точністю майже у 10–15 разів кращі за показники стандартного ФК 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, який зберігає можливість 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 ФК 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. Для цього у якості складових вектора стану були вибраними: висота ПС, швидкість її зміни, кут тангажу та швид-

кість зміни кута тангажу. У підсумку це дозволило адаптувати номінальну модель до особливостей процесу вирівнювання за наявності несправностей та збурень і сприяло зростанню точності процесу ідентифікації несправностей;

– у межах доопрацьованих моделей та розроблених методів на етапі вирівнювання ПС синтезовано модифікований фільтр Кітанідіса (МФК) з невизначеними входами та модифікований локально-оптимальний фільтр Фрідланда (МФФ). Дослідження їх властивостей подано на фоні порівняння з результатами, отриманими від стандартного фільтра Калмана. Основні результати зводяться до наступного:

– результати моделювання роботи стандартного ФК показали його неспроможність усунути залежність отриманих оцінок від впливу несправностей. Наслідком є розбіжність процесу фільтрації та неможливість розрізнення сигналу несправності на фоні шумів. У даному випадку фактична висота не відстежується, а отримана похибка оцінки висоти у 5 метрів може бути причиною зсуву точки дотику до ЗПС приблизно на 250–300 м, що може породжувати нештатну ситуацію у посадковому процесі.

– результати моделювання МФК з невизначеними 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 МФФ 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. Проте досягнення локально-оптимальних показників оцінювання потребує наявності високоякісної моделі системи та додаткової апріорної інформації щодо супутніх збурень та несправностей.

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

– поєднання результатів стендових напівнатурних випробовувань з результатами статистичного моделювання та використанням номограм вигравшів 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.

Наукові та практичні результати проведених досліджень використані у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету, зок-

рема для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в курсі лекцій з дисциплін: «Основи статистичної радіотехніки», «Методи цифрового оброблення інформації», «Сучасні інформаційні технології в телекомунікаціях та радіотехніці», а також при виконанні курсових, бакалаврських і магістерських робіт, знайшли відображення у держбюджетних науково-дослідних роботах з 2014 по 2022 рік. та 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 технічних параметрів інструментальної системи посадки та комплексної радіонавігаційної системи VOR/DME, що знаходяться на об'єктах ДП «Украрорух», «Аеропорт Вінниця»; в задачах діагностики технічного стану радіоелектронних пристроїв, авіаційних контрольних-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.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та переважна більшість результатів дисертаційної роботи одержані автором одноосібно. Частина з них викладено в одноосібних роботах [6, 16, 17, 18, 19, 32, 39, 40, 41, 43, 45, 46]. У роботах, опублікованих у співавторстві авторів, як правило, належали ініціатива та стратегія проведення досліджень за обраним напрямком, постановка задач та пошук шляхів їх розв'язання. У працях, що відображають основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації (додаток В) авторів належать: у роботах [25, 27, 28, 37] аналіз резервів підвищення точності і достовірності кутових вимірювань у радіо технічних 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 РФК, необхідні умови декомпозиції, 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] ана-

ліз методів підвищення точності джитера в стохастичних системах; [5] модель каналу спостережень при наявності різноточних результатів спостережень, синтез пристроїв псевдо байесового 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 відео-конвертора; [42] розробка апаратної реалізації запропонованого алгоритму функції згортки; [48] алгоритмічна реалізація селектора цифрових даних; [49, 52] розробка математичних моделей радіосигналів, синтез алгоритму частотно-го 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 оцінювання стабільності отриманих результатів.

**Апробація результатів.** Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на таких міжнародних науково-технічних 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» ПКТ (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; МНТК "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем", СПРН, (Вінниця, Україна, 2021)

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 52 наукових працях, з яких 12 одноосібних. Серед опублікованих праць 6 статей у журналах що індексуються в наукометричних базах: Scopus, Web of Science, 13 – статей у наукових фахових виданнях України; 2 монографії; 26 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, а також 5 патентів України на корисну модель.

**Структура та загальний обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 464 сторінок, з яких основний зміст викладено на 340 сторінках друкованого тексту та в тому числі містить 91 рисунок і 10 таблиць. Список використаних джерел складається з 284 найменувань на 27 сторінках. Додатки у кількості 5 на 29 сторінках. Додатки містять довідниковий матеріал, часткові результати моделювання, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список праць автора за темою дисертації.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та необхідність розробки спеціальних пристроїв дискретної фільтрації з підвищеною стійкістю до широкого класу неполадок у кутомірному каналі за критерієм «точність - достовірність - апаратурні та програмні затрати». Визначена наукова новизна та практична значимість отриманих результатів, підкреслено зв'язок з науковими програмами, творчий внесок автора, представлена анотація розділів дисертаційної роботи та результати апробації.

У **першому розділі «Постановка задачі та критичний аналіз базових принципів побудови модельно-орієнтованих систем функціональної діагностики»** у доступній формі розглянуто основні принципи побудови модельно-орієнтованих систем функціональної діагностики. Проблема виявлення та локалізації несправностей сформульована у найбільш загальному випадку на основі уведених означень та математичних моделей несправностей у динамічних системах. Характерною ознакою проектування відмовостійких систем є визнання факту, що поява несправностей являє собою неминучий процес. Для складних технічних систем традиційні методи оцінки впливу несправностей не завжди виявляються адекватними та достатніми через їх специфіку, зокрема апаратну, функціональну та просторову надлишковість. У такому разі дія несправностей не означає відмови системи виконувати свою основну функцію, а лише часткову втрату працездатності. Видачу системою помилкових результатів теж слід розглядати, як прояв несправностей, які також необхідно виявляти, локалізувати та ідентифікувати. Отже, на передній план висувається не причина появи спотворень вихідних сигналів, а саме явище помилки та її вплив на працездатність технічної системи. Несправності, що призводять до помилок у вихідних даних, можна класифікувати декількома способами, наприклад: за місцем появи у вигляді збоїв у роботі виконавчих систем регуляторів, різноманітні пошкодження сенсорної підсистеми, неочікувані відхилення параметрів об'єкта контролю (рис.1); за виглядом поведінки у часовій області; за типом математичних моделей – адитивна та мультиплікативна.

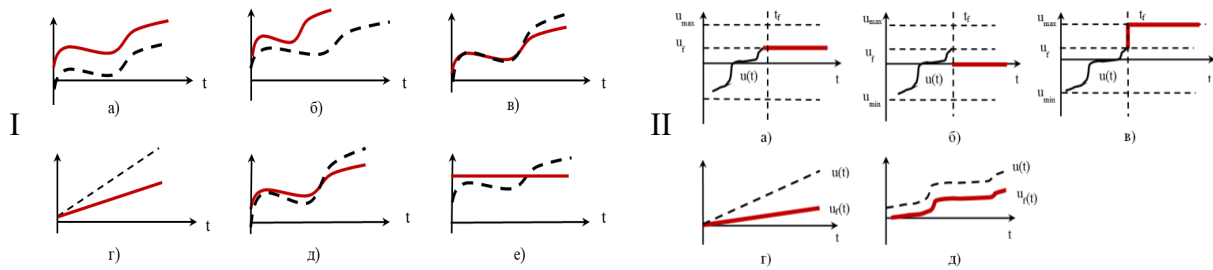


Рис. 1. Візуалізація прояву типових несправностей у підсистемах:  
 I *спостережень*: а) зсув; б) дрейф; в) втрата точності; г) помилки калібрування;  
 д) помилки в обчисленнях; е) ефект «залипання» показів;  
 II *регулятора*: а) режим локального блокування; б) режим короткого замикання; в) відмова типу «залипання»; г) втрата чутливості; д) помилки в обчисленнях

На даний момент часу відома велика кількість методів, що використовуються у системах виявлення та локалізації несправностей у технічних системах. Нижче наводиться загальноприйнята класифікація найбільш поширених методів відповідно до рекомендацій технічного комітету IFAC SAFEPROCESS:

1. Методи виявлення та локалізації несправностей, які не використовують математичні моделі об'єктів контролю: апаратне резервування; тестування на правдоподібність; сигнально-орієнтовані методи. Висока надійність та безпосередність процесу локалізації несправності є головними перевагами цих методів. До недоліків слід віднести зростання маси, габаритів та висока вартість обслуговування, які обумовлені встановленням значної кількості резервних комплектів обладнання. Окрім того, за рахунок їх чисельності та складності вони самі стають додатковими джерелами потоків несправностей та відмов.

2. Модельно-орієнтовані методи виявлення та локалізації несправностей. Засновані на концепції аналітичної надмірності у вигляді кількісних математичних моделей об'єктів контролю: методи діагностичних відновників, паритетних відносин, параметричного оцінювання, синтезу відмовочутливих фільтрів.

3. Альтернативні модельно-орієнтовані методи функціональної діагностики, що використовують інформаційну надмірність у вигляді якісних моделей об'єктів контролю, методи засновані на математичному апараті нечітких множин; нейронних мереж; аналізу дерева відмов; експертного аналізу на основі бази знань.

Концепції аналітичної надмірності та штучного інтелекту опираються на більш сучасні методи обробки інформації: оцінювання параметрів та станів, адаптивної фільтрації, логіки зі змінним порогами, теорії статистичних рішень, розпізнавання образів, теорії евристичних розв'язків та інших логічних операціях. Переважна більшість цих методів не передбачає встановлення додаткового обладнання, що виключає появу додаткових джерел несправностей. У представленій роботі головна увага зосереджена на другій групі методів, об'єднаних спільною постановкою задачі та використанням широко розвиненого апарату матричної алгебри.

Модельно-орієнтована концепція виявлення та локалізації несправностей базується на принципах формування залишкового різницевого сигналу, як основного джерела діагностичної інформації. Термін «залишковий» означає, що різницевий сигнал, сформований у вигляді різниці між фактичним виходом си-

стемі та його оцінкою, отриманою за допомогою заданої математичної моделі, повинен бути очищеним від супутнього фону: системних збурень, похибок моделювання, штучного заниження порядку моделі, впливу перешкод, шумів та тощо. Показано, що різноманітні системи функціональної діагностики можуть бути реалізованими шляхом відповідної обробки залишкового різницевого сигналу. Представлена узагальнена схема формувача (генератора) залишкового різницевого сигналу, з якої усі інші формати різницевого сигналу випливають, як окремі випадки. Уведення критеріїв виявлення несправностей дозволило обґрунтувати міру достовірності виявлення несправностей. Коротко висвітлені питання локалізації несправностей та способи формування векторного різницевого сигналу.

Виконано порівняльний аналіз модельно-орієнтованих методів функціональної діагностики (див. табл.1), що дозволило сформулювати перелік задач, які потребують подальшого розв'язку.

Таблиця 1

Результати порівняльного аналізу модельно-орієнтованих методів виявлення та локалізації несправностей

Показники	Методи:		
	Діагностичних спостерігачів	Паритетних відносин	Оцінювання параметрів
Можливість виявлення та локалізації несправностей у сенсорах, підсистемах регулятора та компонентах об'єкта контролю	Локалізація несправностей у сенсорах, підсистемах регулятора та компонентах об'єкта контролю здійснюється шляхом: 1. Уведення структурованих різницевих сигналів у схеми пристроїв відновлення спеціального типу 2. Використання виявляючих фільтрів з уведенням структурно-орієнтованих різницевих сигналів	Структуровані різницеві сигнали формуються шляхом введення спеціальних ортогональних паритетних відносин	1. Локалізація несправностей досягається шляхом аналізу чутливості кореляційної матриці похибок оцінювання до зміни параметрів 2. Різницевий сигнал зробити орієнтованим принципово неможливо 3. Процедури виявлення та локалізації несправностей практично реалізувати можливо, проте вони надзвичайно складні
Можливість виявлення та локалізації несправностей таких, що тільки зароджуються, нарівні з раптовими	Реакція на зароджувані несправності дуже швидка	Можливе введення структурно-орієнтованих різницевих сигналів, проте це супроводжується значними труднощами практичного характеру	Реакція на зароджувані несправності суттєво сповільнена
Спосіб обробки шумів у системі;	Статистичні властивості шумів: 1. Відомі: використання фільтра Калмана та його модифікацій для фільтрації різницевого сигналу 2. Невідомі: застосування додаткових методів фільтрації за умови, що шуми та несправності знаходяться у заданих межах	Застосовується додатковий фільтр до різницевого сигналу за умови, що шуми та несправності знаходяться у заданих межах	Обробка шумів виконується безпосередньо у процесі оцінювання
Схема обробки багатократних несправностей	1. При наявності достатньої кількості результатів спостережень обробка багатократних несправностей відносно проста	"..."	Необхідно встановлювати велику кількість додаткових сенсорів
Схема обробки адитивних несправностей	Схема обробки проста	"..."	"..."
Схема обробки мультиплікативних несправностей	Виявлення та локалізація параметричних несправностей можлива, проте складність зростає	"..."	"..."
Враховання не лінійності характеристик об'єкта контролю	1. Застосування лінійних спостерігачів до лінеаризованих моделей, проте можуть виникати складності з системами високого порядку 2. Безпосереднє використання нелінійних спостерігачів оптимального або квазіоптимального типу до нелінійностей окремих видів	Можливе застосування лише до лінійних моделей. При застосуванні до нелінійних моделей з'являються дуже суттєві труднощі	Можливе використання методів ідентифікації для нелінійних систем
Спосіб забезпечення нечутливості до непередбачуваних збурень	Підвищена стійкість до збурень невизначеної структури забезпечується застосуванням пристроїв відновлення: 1. З невизначеними входами. 2. Завданням власної структури	1. Метод ортогональних паритетних відносин для адитивних несправностей. 2. Метод оптимальних паритетних відносин у системах, зміна параметрів яких не виходить за задані межі	Залежить, головним чином, від стійкості схем оцінювання
Рівень складності та можливість спрощень	1. Процес проектування носить системний характер і відносно нескладний 2. Простота реалізації методів обробки та їх модифікації	"..."	1. Потребує великого об'єму додаткових складних обчислень 2. Процес проектування є системним, проте ускладненим
Об'єм апріорної інформації	Потребує математичних моделей підвищеної точності	Мають місце труднощі залучення апріорних статистичних даних	Потребує завдання структурної моделі без завдання математичної моделі зміни параметрів
Спосіб адаптації та можливість самонавчання	1. Застосування адаптивних пристроїв відновлення для систем зі змінними у часі або повністю невідомими параметрами 2. Застосування методів факторизації до лінійних або лінеаризованих моделей	Результатів досліджень у цьому напрямку не виявлено	Адаптаційні властивості та здатність самонавчатись дуже добрі, якщо використовувати адаптивні методи оцінювання

Аналіз порівняльної таблиці показує, що переважну більшість прикладних задач функціональної діагностики можна успішно розв'язувати, залишаючись у межах магістрального напрямку, заснованого на концепції модельно-орієнтованих відновників, оскільки інші методи цього класу є лише окремими



їх випадками. Безсумнівною перевагою висунутої робочої гіпотези є опора на теоретичні положення фундаментальних робіт О'Рейлі–Луенбергера та Калмана, що дозволяє: з єдиних позицій розглядати як детермінований, так і стохастичний варіант задач виявлення несправностей, їх локалізацію та ідентифікацію у динамічних системах неперервного та дискретного часу; бути вільним від надто обтяжливих обмежень, і у той же час відрізнитись високою оперативністю без потреби встановлення додаткового обладнання; опиратись на широко розгалужений апарат матричної алгебри, доповнений високоефективним програмним забезпеченням системи MatLab. У сукупності, це дає підставу вважати, що висунута гіпотеза має перспективу. Надалі, на методах саме цього класу буде зосереджена основна увага з урахуванням переліку сформульованих завдань. Причому, слід зазначити, що предметом уваги будуть не стільки всебічно досліджені класичні функціональні відновники О'Рейлі–Луенбергера та ФК, а скільки необхідність їх модифікації для використання у якості інструментарію дослідження таких, вельми специфічних задач, як виявлення несправностей, їх локалізація та ідентифікація в динамічних системах реального часу з метою функціонального захисту від можливих порушень роботоздатності.

У другому розділі роботи – «Розробка теоретичних основ модельно-орієнтованих діагностичних відновників» у центрі уваги знаходились методи синтезу пристроїв відновлення діагностичного типу, порядок яких співпадає з порядком контрольованої системи. Синтез таких пристроїв виконувався методами теорії функціональних відновників з невизначеними входами. Для досягнення цієї локальної мети та її теоретичного обґрунтування був сформований дискретний варіант задачі синтезу функціонального пристрою відновлення з залученням основних положень теорії керованості та відновлюваності динамічних систем за Калманом. Уточнені поняття не відновлюваних компонент вектора стану, сформовані критерії їх виявлення та ідентифікації. У основу розглянутих критеріїв покладено опис динамічної системи у канонічній формі відновлюваності. У формі розгорнутих тез викладено головні положення теорії функціональних відновників О'Рейлі – Луенбергера. Базова структура синтезованого відновника представлена на рис. 2, а її дискретний аналог описується співвідношеннями табл. 2. Вищезазначені матеріали являють собою відправну теоретичну базу для подальших досліджень. Значна увага приділена синтезу *оптимальних відновників* у диференціальній або рекурентній формі методом зважених найменших квадратів. Синтез виконано за допомогою спрощеного методу інваріантного занурення Р. Беллмана. Показано, що структура оптимального пристрою не залежить від обраного критерію якості, наприклад, мінімізації байєсового ризику, мінімуму апостеріорної дисперсії, максимуму функції правдоподібності або апостеріорної ймовірності, а відмінності проявляються лише у значеннях матричного коефіцієнта передачі, який визначаються обсягом доступних апріорних даних.

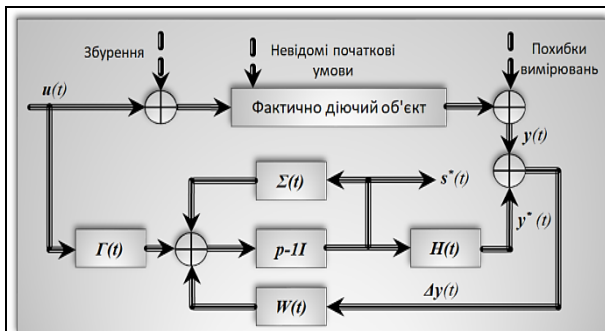


Рис. 2. Структура динамічного відновлення шляхом застосування системи зворотного зв'язку

Показано, що оцінка і похибка  $\Delta s(t)$  мають ідентичні динамічні матриці, а це означає що похибка  $\Delta s(t)$  буде прямувати до нуля за будь-яких  $\Delta s(t_0)$  при  $t \rightarrow \infty$  лише тоді, коли відновник є асимптотично стійким. Стійкість пристрою визначається характеристичними числами матриці  $[\Sigma(t) - W(t)H(t)]$  – полюсами відновника. Для досягнення швидкої збіжності оцінок доцільно вибирати  $W(t)$  якомога більшим, проте занадто великі  $W(t)$  зроблять схему відновлення чутливою до шумів спостережень. Існує компроміс, для досягнення якого потрібна додаткова інформація щодо характеристик системи, зокрема про такі поняття, як керованість та відновлюваність.

Таблиця 2

#### Математичний опис структури дискретної форми відновника

1. Модель системи	$s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k), \quad y(k) = H(k)s(k)$
2. Модель відновлювача	$s^*(k+1) = A(k+1, k)s^*(k) + B(k+1, k)u(k) + M(k)y(k)$
3. Структура оцінки:	$s^*(k+1) = [\Sigma(k+1, k) - W(k)H(k)]s^*(k) + B(k+1, k)u(k) + W(k)y(k)$
4. Умови існування:	$A(k+1, k) = [\Sigma(k+1, k) - W(k)H(k)]; \quad B(k+1, k) = \Gamma(k+1, k); \quad W(k) = M(k);$
5. Динаміка похибки	$\Delta s(k+1) = [\Sigma(k+1, k) - W(k)H(k)]\Delta s(k)$

**Функціональні пристрої відновлення діагностичного типу** і відновник вектора стану системи поняття близькі, проте не еквівалентні. За відсутності дестабілізуючих факторів адекватність моделі гарантує нульовий сигнал похибки. У протилежному разі у ньому віддзеркалюються усе, що осталося поза математичною моделлю, у тому числі: збурення та несправності, помилки моделювання, флуктуації параметрів, дрейфи, невраховані нелінійні залежності, завади та шуми. Якщо вирішується задача виявлення та локалізації несправностей, то по-перше, різницевий сигнал повинен бути чутливим стосовно заданого переліку типів несправностей, а по-друге потрібно позбутися фону, створюваного побічними дестабілізуючими факторами, що не представляють інтересу. У такому разі різницевий сигнал повинен бути підданий попередній обробці, виходячи з аналізу його спектрального складу, схематично показано на рис.3. В задачах синтезу пристроїв відновлення повного порядку системні невизначеності інтерпретуються, як невідомі збурення і відображаються у математичній моделі шляхом введенням додаткових неконтрольованих входів. Уведемо означення, на яке у подальшому опиратимось результати синтезу у припущенні заданої моделі системи у вигляді:

$$\dot{s}(t) = \Sigma s(t) + \Gamma u(t) + \Omega d(t), \quad y(t) = Hs(t), \quad (1)$$

де  $d(t) \in \mathcal{R}^l$  – невідомий вектор вхідних збурень;  $\Sigma, \Gamma, \Omega, H$  – відомі матриці.

**Означення 1.** Для стаціонарної динамічної системи (1) пристроєм відновлення з невизначеним входом є такий відновник повного порядку

$$z'(t) = Az(t) + T\Gamma u(t) + Wy(t); \quad y_z(t) \triangleq s^*(t) = z(t) + Sy(t), \quad (2)$$

у якому похибка оцінювання вектора стану асимптотично прямує до нуля незалежно від того присутнє, чи не присутнє невідоме збурення на її вході.

Структура пристрою показана на рис. 4.

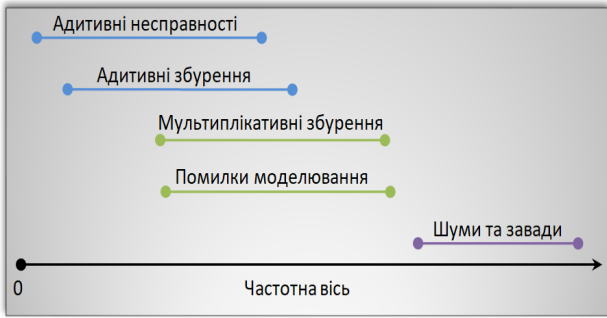


Рис. 3. Співвідношення частотних діапазонів основних дестабілізуючих факторів

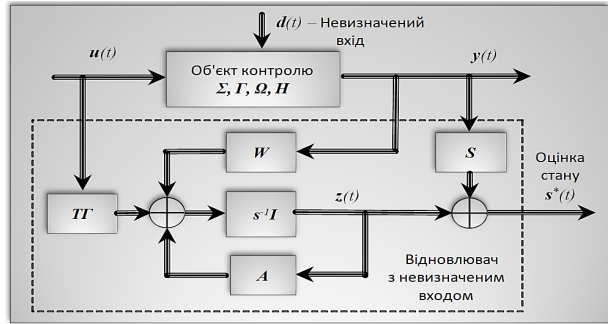


Рис. 4. Структура пристрою відновлення з невизначеним входом

Умови існування відновника визначаються теоремою 1, порядок синтезу табл.3.

**Теорема 1.** Для того, щоб динамічна система  $\dot{z}(t) = Az(t) + T\Gamma u(t) + Wy(t)$   $s^*(t) = z(t) + Sy(t)$  була пристроєм відновлення з невизначеним входом для об'єкта  $\dot{s}(t) = \Sigma s(t) + \Gamma u(t) + \Omega d(t); \quad y(t) = Hs(t)$ , необхідно і достатньо виконання умов:  
 а)  $rank(H\Omega) = rank(\Omega)$ ; б) пара  $(H, \Sigma_1)$  була б виявлюваною, а  $\Sigma_1 = \Sigma - \Omega(H\Omega)^\# H\Sigma$ .

Таблиця 3

Рекомендований порядок синтезу відновника з невизначеним входом

1. Перевірити ранги матриць $\Omega$ та $H\Omega$ , якщо $rank(H\Omega) \neq rank(\Omega)$ , то такого пристрою відновлення не існує і надалі перейти до п.10.
2. Обчислити матриці $S^*$ , $T$ , $\Sigma_1$ за формулами: $S^* = \Omega [(H\Omega)^T H\Omega]^{-1} (H\Omega)^T$ ; $T = I - S^*H$ ; $\Sigma_1 = T\Sigma$ .
3. Перевірити чи пара $(H, \Sigma_1)$ є відновлюваною. Якщо це має місце, то пристрій відновлення існує, і матриця $W_1$ може бути обчислена за допомогою програми розташування полюсів. Перейти до п. 9.
4. Сконструювати матрицю перетворення $U$ для переходу до канонічної форми відновлюваності. Для цього слід довільно вибрати пари $(H, \Sigma_1)$ і створити вектор-рядок $u_{n_1}^T, \dots, u_{n_1}^T$ з $N_{n_1}$ , разом з іншим $(n-n_1)$ вектор-рядком $u_{n_1+1}^T, \dots, u_{n_1}^T$ для утворення не сингулярної матриці $U = [u_1, \dots, u_{n_1}; u_{(n_1)+1}, \dots, u_n]^T$ .
5. Пару $(H, \Sigma_1)$ привести до канонічної форми відновлюваності за формулами $U\Sigma_1 U^{-1} = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & 0 \\ \Sigma_{12} & \Sigma_{22} \end{bmatrix}; \quad H U^{-1} = [H_1, 0]$
6. Перевірити чи пара $(H, \Sigma_1)$ є виявлюваною. Якщо будь-яке власне значення матриці $\Sigma_{22}$ нестійке, то пристрою відновлення не існує і перейти до п. 10.
7. Вибрати $n_1$ бажаних власних значень та присвоїти їх виразу $\Sigma_{11} - W_{1u}H_1$ , далі з використанням програми розташування полюсів обчислити $W_{1u}$ .
8. Обчислити вираз $W_1 = U^{-1}W_u = U^{-1} \begin{bmatrix} W_{1u} \\ W_{2u} \end{bmatrix}$ , де $W_{2u}$ – довільна матриця розміру $(n-n_1) \times m$ .
9. Обчислити матриці $A$ і $W$ за формулами: $A = \Sigma_1 - W_1H$ ; $W = W_1 + W_2 = W_1 + AS$ .
10. Завершення процесу синтезу.

**Локалізація несправностей** пристроями відновлення з невідомими входами полягає у визначенні окремого сенсора або виконавчого пристрою, у якому відбулася несправність. Одним з можливих підходів (див рис.4–5) є формування різницевих сигналів таким чином, щоб кожен з них став чутливим до усіх несправностей, за винятком однієї, тієї яка являє інтерес. При цьому неважливо, де відбулася несправність у сенсорній чи у виконавчій підсистемі.

**Третій розділ – «Неявні методи виявлення та локалізації несправностей у стохастичних системах у межах використання байєсової методології»** присвячений питанням проектування стохастичних пристроїв відновлення вектора стану систем, що мають підвищену стійкість до несправностей у сенсорній підсистемі.

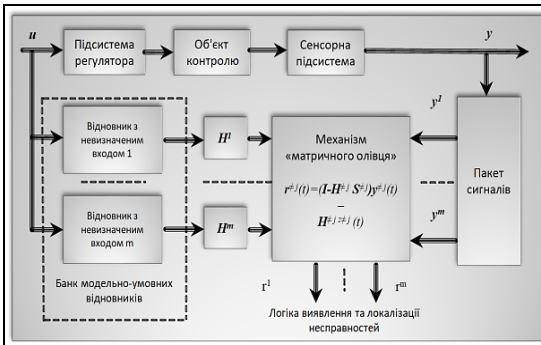


Рис. 4. Структура процесу локалізації несправностей у сенсорній підсистемі

**Надійність процесу локалізації несправностей у сенсорах**

**Умова:** виконавча система завідомо справна.

**Модель:**  $\dot{s}(t) = \Sigma s(t) + \Gamma u(t) + \Omega d(t)$ ,  $y^j(t) = H^{*j} s(t) + f_s^{*j}(t)$ ,

$y_j(t) = H_j s(t) + f_{s_j}(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .  $H^{*j} \in \mathcal{R}^{(m-1) \times n}$  утворюється з матриці  $H$  видаленням  $j$ -го рядку  $H_j$ .

**Динаміка відновлювача:**  $\dot{z}^{*j}(t) = A^{*j} z^{*j}(t) + T^{*j} \Gamma u(t) + W^{*j} y^j(t)$ ,

**Різницевий сигнал:**  $r^{*j}(t) = (I - H^{*j} S^{*j}) y^j(t) - H^{*j} z^{*j}(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$

**Обмеження:**  $A^{*j} = T^{*j} \Sigma - W_1^{*j} H^{*j}$  – стійка,

$S^{*j} H^{*j} \Omega = \Omega$ ;  $T^{*j} = I - S^{*j} H^{*j}$ ;  $W_2^{*j} = A^{*j} S^{*j}$ ;  $W^{*j} = W_1^{*j} + W_2^{*j}$

**Прийняття рішень:**  $\|r^j(t)\| < \Pi_s^j$ ;  $\|r^k(t)\| \geq \Pi_s^k$

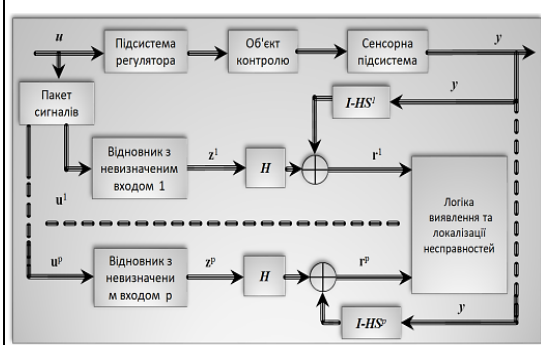


Рис. 5. Структура процесу локалізації несправностей у підсистемах регулятора

**Надійність процесу локалізації несправностей у регуляторі**

**Умова:** сенсорна система завідомо справна.

**Модель:**  $\dot{s}(t) = \Sigma s(t) + \Gamma^{*i} u^{*i}(t) + \Gamma^{*i} f_a^{*i}(t) + \gamma_i [u_i(t) + f_{ai}(t)] + \Omega d(t) =$

$= \Sigma s(t) + \Gamma^{*i} u^{*i}(t) + \Gamma^{*i} f_a^{*i}(t) + \Omega^{*i} d^{*i}(t)$ ;  $y(t) = Hs(t)$ ;  $i = 1, 2, \dots, p$ ,

де  $\Omega^{*i} = [\Omega \ \gamma_i]$ ;  $d^{*i}(t) = \begin{bmatrix} d(t) \\ u_i(t) + f_{ai}(t) \end{bmatrix}$ ; для  $i = 1, 2, \dots, p$ .

**Динаміка відновлювача:**

$\dot{z}^{*i}(t) = A^{*i} z^{*i}(t) + T^{*i} \Gamma^{*i} u^{*i}(t) + W^{*i} y(t)$ .

**Різницевий сигнал:**

$r^{*i}(t) = (I - HS^{*i}) y(t) - H z^{*i}(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$

**Обмеження:**  $A^{*i} = T^{*i} \Sigma - W_1^{*i} H$  – стійка,

$S^{*i} H \Omega^{*i} = \Omega^{*i}$ ;  $T^{*i} = I - S^{*i} H$ ;  $W_2^{*i} = A^{*i} S^{*i}$ ;  $W^{*i} = W_1^{*i} + W_2^{*i}$

**Прийняття рішень:**  $\|r^j(t)\| < \Pi_s^j$ ;  $\|r^k(t)\| \geq \Pi_s^k$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ .

Поставлені задачі розв'язувались на основі використання байєсової методології за умови наявності високоякісної розширеної номінальної математичної моделі системи спостережень, пов'язаної з несправностями та апіорних даних щодо статистичних характеристик діючих шумів на рівні середніх значень та коваріаційних матриць. Першим кроком на цьому шляху була побудова пристрою відновлення повного порядку за умови відсутності несправностей (див. рис. 6).

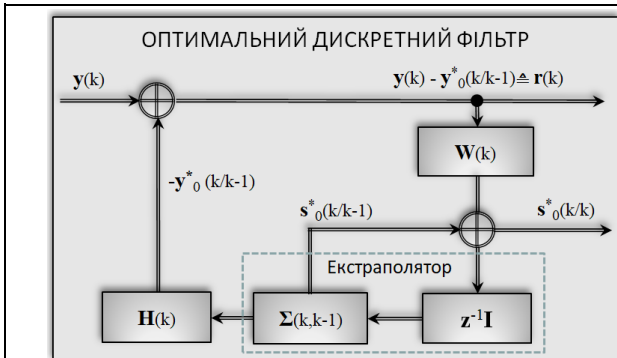


Рис. 6. Структура процесу формування оптимальних оцінок у фільтрі Калмана

**Модель номінальної системи**  
 $s(k+1) = \Sigma(k+1, k) s(k) + \Gamma(k+1, k) u(k) + w(k)$ ;  
 $y(k) = H(k) s(k) + v(k)$ .  
**Алгоритм стандартного фільтра Калмана**  
 $s_0^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1) s_0^*(k-1/k-1)$ ;  
 $P(k/k-1) = \Sigma(k, k-1) P(k-1/k-1) \Sigma^T(k, k-1) + Q(k-1)$ ;  
 $W(k) = P(k/k-1) H^T(k) [H(k) P(k/k-1) H^T(k) + R(k)]^{-1}$ ;  
 $s_0^*(k/k) = s_0^*(k/k-1) + W(k) [y(k) - H(k) s_0^*(k/k-1)]$ ;  
 $P(k/k) = [I - W(k) H(k)] P(k/k-1)$ .

Надалі цей пристрій у вигляді стандартного ФК слугував у якості базового інструментарію для подальших досліджень та як зразок для порівняльного аналізу.

**Запропонована математична модель** сенсорної підсистеми з невизначеним станом, в основу якої покладена реконструкція номінальної моделі каналу спостережень. Наявність невизначеного стану не виключає існування результатів спостережень різної точності, а несправності у сенсорній підсистемі розглядаються як окремий випадок цієї моделі і інтерпретуються у вигляді аномальних похибок. На відміну від відомих робіт внесена пропозиція строго аргументована. Наведені факти на користь її змістовності та універсальності. **Показано**, що залишаючись у межах байєсового підходу та гаусово-марковських моделей діючих шумів за допомогою запропонованої моделі каналу спостережень можна отримати оптимальний варіант пристрою оцінювання, проте його реалізація потребує використання сукупності модельно-умовних ФК, кожен з яких налаштований на відповідну реалізацію параметричної послідовності гілчастого процесу. Оскільки, у часі число таких фільтрів зростає у темпі  $N^{(k+1)}$ , то за великих значень  $k$  це призводить до перевантаження обчислювальних засобів. Уведення поняття псевдобайєсової оцінки дозволило отримати за рахунок втрати строгої оптимальності практично прийнятний варіант реалізації пристрою відновлення, стійкого до несправностей у каналі спостережень. Синтезований пристрій являє собою структуру, що складається з  $N$  модельно-умовних ФК, де  $N$  – число конкуруючих гіпотез. Показано, що для практичних цілей достатньо обмежитись 3–5 базовими гіпотезами. У тому разі, коли основний інтерес концентрується навколо впливу аномальних похибок на загальну точність процесу відновлення вектора стану достатньо обмежитись двома гіпотезами, одна з яких стосується справності каналу спостережень –  $H_0$ , а її альтернатива  $H_a$  – наявності аномальних похибок. Дана наближена оцінка обчислювальних витрат, що супроводжують процес практичної реалізації розробленої схеми фільтрації та визначені шляхи подолання зазначених труднощів. Результат синтезу подано на рис. 7.

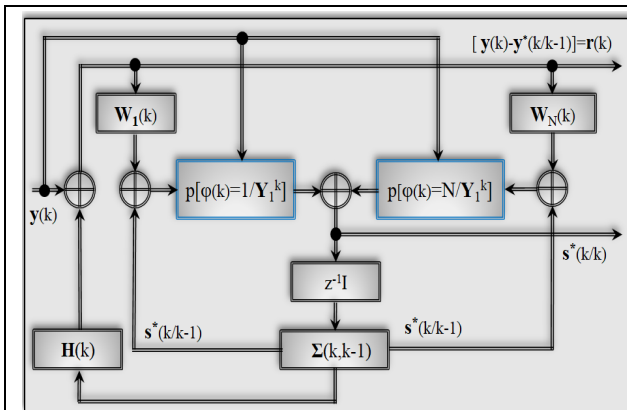


Рис. 7. Структурна схема фільтра, стійкого до несправностей у сенсорній підсистемі

**Модель системи з аномаліями у каналі спостережень:**  $y(k) = H(k)s(k) + \varphi(k)v(k)$ ,

$$s(k+1) = \Sigma(k+1,k)s(k) + w(k); \quad s(0) = s_0$$

**Алгоритм формування оцінок стійких до несправностей у каналі спостережень**

$$s^*(k/k) = s_1^*(k/k) p[\varphi(k) = 1/Y_1^k] + s_N^*(k/k) p[\varphi(k) = N/Y_1^k];$$

$$p[\varphi(k) = i/Y_1^k] = q_i(k) \pi[y(k)/Y_1^{k-1}, \varphi(k) = i] \times$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^N q_i(k) \pi[y(k)/Y_1^{k-1}, \varphi(k) = i] \right\}^{-1};$$

$$P(k/k) = \left\{ P_1(k/k) + [s_1^*(k/k) - s^*(k/k)][s_1^*(k/k) - s^*(k/k)]^T \right\} p[\varphi(k) = 1/Y_1^k] +$$

$$\left\{ P_N(k/k) + [s_N^*(k/k) - s^*(k/k)][s_N^*(k/k) - s^*(k/k)]^T \right\} p[\varphi(k) = N/Y_1^k].$$

Той факт, що аномальні похибки у каналі спостережень моделюються шляхом раптового зростання параметричної змінної  $\varphi(k)$  до значень значно більших одиниці дозволяє побудувати на основі запропонованого підходу та реконструйованої моделі каналу спостережень низку робастних пристроїв оцінювання, які маючи спрощену структуру або схему обчислень, все ж зберігають здатність протистояти дії несправностей.

**Робастний пристрій структурно-укороченого типу** синтезується за допомогою метода, що має на меті заміну паралельно працюючої пари модельно-умовних ФК одним фільтром, налаштованим на гіпотезу про справний стан каналу спостережень. Для цього пропонується у коло зворотного зв'язку увести блок корегування значень матричного коефіцієнта передачі, робота якого скеровується комутатором поєднаним зі схемою обчислення апостеріорної ймовірності коректної роботи каналу спостережень. За умови відсутності несправностей у каналі спостережень синтезований пристрій вироджується у стандартний ФК. У тому разі, коли у результатах спостережень мають місце аномальні похибки результати фільтрації альтернативного каналу зважуються за допомогою величини  $W_N(k)$  близькою до нуля, оскільки вона обернено пропорційна до значень  $N^2 R_0(k)$ . Оскільки  $N \gg 1$ , то це еквівалентно розриву кола зворотного зв'язку і переходу цієї ділянки фільтра у режим екстраполяції без використання результатів спостережень, що містять аномальні викиди.

**Запропоновано метод побудови робастного пристрою оцінювання підвищеної швидкодії**, який розроблявся з метою подолання труднощів обумовлених складністю розрахунків апостеріорної ймовірності справного стану каналу спостережень. Суть проблеми полягає у тому, що за великої частоти оновлення результатів спостережень та швидкої динаміки досліджуваного об'єкту формування сигналу керування модернізованим матричним коефіцієнтом передачі  $W_M(k)$  може бути занадто запізненным і це перешкоджатиме досягненню оперативності процесу оцінювання. Автором запропоновано замінити блок обчислення вищезазначеної ймовірності селекторною схемою, що працює за правилами бінарної логіки. Рішення про справність каналу спостережень приймається за умови потрапляння поточного значення результату спостережень у попередньо виставлений селекторний імпульс. Оскільки якісь оцінок невинно покращується за рахунок надходження нових результатів спостережень, то ширина селекторного імпульсу являє собою змінну величину. У зв'язку з цим на шляху пошуку оптимальних значень цієї величини зустрічаються певні складнощі суто математичного характеру. У даній роботі ця задача вирішувалась шляхом виконання обчислювального експерименту за методом Моте-Карло, у якому ширина стробу вибиралась з ряду  $\mathcal{E}_1(k/k-1), 2\mathcal{E}_1(k/k-1), 3\mathcal{E}_1(k/k-1)$ . Найбільш обнадійливі результати були отримані за варіантом  $2\mathcal{E}_1(k/k-1)$ .

**Синтез робастного пристрою оцінювання лінійного типу** виконувався з метою отримання гранично спрощеного способу отримання оцінок вектора стану, які ще зберігають мінімальну можливість протистояти впливу несправностей у каналі спостережень. Оскільки необхідними умовами належності поточної оцінки до класу лінійних є їх лінійна залежність від результатів поточних спостережень та розрахунок коваріаційної матриці похибок фільтрації лише на основі апріорних даних, то основні етапи синтезу зводились до наступних кроків: усунення блоків обчислення апостеріорних ймовірностей шляхом їх заміни апріорно відомими величинами; апроксимації полімодальних густин розподілу гаусовими; уведенні шуму з модифікованою коваріаційною матрицею. За умови виконання уведених заходів синтезований робастний фільтр стає

структурно ідентичним стандартному ФК, проте він залишається лише квазіоптимальним, оскільки завжди зберігається співвідношення  $R \geq R_0(k)$ . Як правило, апріорні та апостеріорні дані значно відрізняються, тому синтезований фільтр забезпечує захист від впливу аномальних викидів у результатах спостережень за рахунок банального звуження смуги пропускання, що має наслідком зростання рівня динамічних похибок на усіх ділянках фільтраційного процесу.

**Запропоновано метод подолання апріорної невизначеності** щодо ймовірності появи аномальних похибок у каналі спостережень, принципова відмінність якого полягала у заміні заздалегідь відомих величин  $q_1(k)$ , присутніх у розрахунках апостеріорної ймовірності справного стану каналу спостережень їх середніми значеннями  $\overline{q_1(k)}$  на інтервалі осереднення  $[0,1]$ . Аналіз отриманих результатів показав, що розширення функціональних можливостей синтезованого пристрою потребує суттєвого ускладнення процедури обчислення ймовірності справної роботи каналу спостережень, при цьому в оперативній пам'яті на кожному кроці обчислень необхідно зберігати неперервну густину розподілу  $\pi[q_1/Y_1^k]$ . Ця обставина може бути вирішальною щодо практичного застосування даного методу з включенням елементів адаптивного прийому сигналів, а оцінка його ефективності потребує значного об'єму статистичних випробувань.

**У четвертому розділі – «Методи виявлення та локалізації несправностей за умови апріорної невизначеності»** розглядаються задачі, що пов'язані з випадками, коли несправності у підсистемах регулятора, об'єкта контролю або у сенсорній підсистемі з'являються час від часу епізодично і настільки рідко, що статистичні дані про частоту їх появи відсутні. Правило завдання найгіршого розподілу, яке використовують у байєсовому підході, та наступного переходу до адаптивних схем оцінювання стає неефективним, оскільки призводить до суттєвого зростання обчислювальних ресурсів, а процес адаптації проходить надзвичайно повільно. Таким чином у розпорядженні проектувальника залишається єдиний інструмент у вигляді стандартного ФК, налаштованого на номінальний режим роботи об'єкту контролю. За таких обставин ФК, будучи оптимальним, формує поточну оцінку вектору стану на основі усієї попередньої історії і з часом стає занадто обережним та мляво реагує на швидкі зміни у результатах спостережень. Існує декілька шляхів у вирішенні цієї проблеми.

**У першому** з них використовуються процедури примусового розширення смуги пропускання фільтра порівняно з оптимальною, унаслідок чого процес фільтрації ставав квазіоптимальним. Для цього застосовувалось обмеження знизу величини матричного коефіцієнта передачі, коваріаційної матриці похибок фільтрації, або тривалості пам'яті фільтра шляхом уведення двох шкальної схеми фільтрації. До недоліків цих схем слід віднести відсутність систематичної процедури вибору нижньої границі значень змінюваних параметрів, візуальний шлях спостереження характерних змін у поведінці поточних оцінок та неможливість подальшої локалізації виявлених несправностей.

**Основу другого напрямку** склали роботи, пов'язані з використанням елементів параметричної або (та) структурної адаптації системи у темпі реального часу. Це передбачає застосування методів сукупного виявлення, оцінювання та ідентифікації, як параметрів системи, так і її структури у режимі реального часу. Недоліки таких схем відзначались у низці робіт, зокрема у авторській монографії.

**Ідейну основу робіт третього** напрямку склали роботи засновані на принципах декомпозиції розширеного фільтра Калмана (РФК) за методом Фрідланда, спеціалізованих фільтрів, чутливих до несправностей та модифікованих стохастичних відновників Луенбергера, розв'язаних від невизначених входів.

У **підрозділі 4.3** у межах цього напрямку розглянута задача оцінювання систематичних похибок сенсорної підсистеми, які проявляються у вигляді зсувів, дрейфів, втрат чутливості за умови, що кількість вимірювальних засобів значно перевищує порядок номінальної моделі об'єкта контролю. Практичний аспект такої задачі насамперед пов'язаний з проведенням комплексних льотних випробовувань з використанням сукупності різнотипних вимірювальних засобів, наприклад, датчиків кутових та лінійних швидкостей, акселерометрів, камер спостереження, РЛС або з визначенням координат рухомих об'єктів на основі застосування множини однотипних безконтактних датчиків, розташованих певним чином на місцевості або морській поверхні. Як правило, ці засоби об'єднуються у єдиний вимірювальний комплекс, а результати спостережень використовуються для оптимального, у певному розумінні, оцінювання параметрів траєкторії об'єктів у режимі реального часу.

Однією з проблем оцінювання стану об'єкта за результатами виконаних комплексних спостережень є необхідність врахування несумісності окремих результатів спостережень через появу систематичних похибок. Тривіальний шлях розв'язку цієї проблеми полягає у тому, що для кожної суттєвої складової систематичної похибки вводиться додаткова змінна стану, а потім виконується процедура оптимального оцінювання для розширеного, таким чином, вектору стану. Проте, якщо навіть враховувати лише одну суттєву несправність у кожному сенсорі, то розмірність розширеного фільтра може значно зростати. Використання ФК такої розмірності у системах реального часу, щонайменше, є недоцільним. Отже, повинна бути застосована і розвинена дещо інша технологія, яка дозволяла б враховувати наявність систематичних похибок у сенсорній підсистемі не виходячи при цьому за рамки теорії оптимальної фільтрації. Суть підходу Фрідланда полягала у розділенні РФК на два паралельно і автономно працюючі фільтри, один з яких оцінює вектор стану об'єкта за умови відсутності систематичних похибок, а інший – оцінює у незалежний спосіб систематичні похибки. У даному підрозділі використовуються основні ідеї цієї роботи, проте з дещо іншою метою, а саме *встановлення протиріччя при уведенні структурних обмежень, що супроводжують процедуру вказаної декомпозиції*. Формально-математична сторона процедури декомпозиції за Фрідландом представлена у табл.4.

**Оцінка наслідків процедури декомпозиції** полягає у тому, що локальна оптимальність розщепленого фільтра вимагає відсутності стохастичної складової



вої у динаміці систематичної похибки, тобто  $Q_d(k)=0$ . Проте, за таких обставин, часто буває неможливим гарантувати збіжність підсумкових оцінок, і не зовсім очевидно, як це обмеження можливо обійти або послабити. Більш аргументоване з'ясування цього питання буде предметом досліджень, виконаних у п'ятому розділі, присвяченому ідентифікації несправностей методами локально-оптимального роздільного оцінювання.

Таблиця 4

<p><b>1. Модель системи за наявності систематичних похибок у каналі спостережень</b></p> $s(k) = \Sigma(k, k-1)s(k-1) + w_s(k-1);$ $y(k) = H(k)s(k) + D(k)d(k) + v(k);$ $d(k) = \Omega(k, k-1)d(k-1) + w_d(k-1).$ <p><b>2. Формування оцінок, узгоджених з гіпотезою <math>H_0</math> про відсутність несправностей</b></p> $s_0^*(k/k) = s_0^*(k/k-1) + W_{s_0}(k)[y(k) - H(k)s_0^*(k/k-1)];$ $s_0^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)s_0^*(k-1/k-1);$ $W_{s_0}(k) = P_{s_1}(k/k)H^T(k)R^{-1}(k);$ $P_{s_0}(k/k) = [P_{s_1}(k/k-1) + H(k)R^{-1}(k)H^T(k)]^{-1};$ $P_{s_1}(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)P_{s_1}(k-1/k-1)\Sigma^T(k, k-1) + Q_{s_0}(k-1).$	<p><b>3. Формування оцінок систематичних похибок</b></p> $d^*(k/k) = d^*(k/k-1) + W_d(k)[y(k) - H(k)s_0^*(k/k-1) - S(k)d^*(k/k-1)];$ $d^*(k/k-1) = \Omega(k, k-1)d^*(k-1/k-1); W_d(k) = P_{dd}(k/k)S^T(k)P_{rr}^{-1}(k/k-1);$ $S(k) = D(k)\Omega(k, k-1) + H(k)T(k, k-1);$ $P_{rr}(k/k-1) = H(k)P_{s_1}(k/k-1)H^T(k) + R(k);$ $P_{dd}(k/k) = [P_{dd}^{-1}(k/k-1) + S^T(k)P_{rr}^{-1}(k/k-1)S(k)]^{-1};$ $P_{dd}(k/k-1) = \Omega(k, k-1)P_{dd}(k-1/k-1)\Omega^T(k, k-1).$ <p><b>4. Формування підсумкових оцінок</b></p> $s_1^*(k/k) = s_0^*(k/k) + T(k)d^*(k/k); T(k) = T(k, k-1) - W_{s_0}(k)S(k);$ $T(k, k-1) = \Sigma(k, k-1)T(k-1); P_{s_1}(k/k) = P_{s_0}(k/k) + T(k)P_{dd}(k/k)T^T(k).$
---	---

**У підрозділі 4.4.** запропонована модифікація методу діагностики несправностей у підсистемах регулятора на основі застосування виявляючих фільтрів за умов: статистичні дані про частоту появи несправностей відсутні, вони носять одноразовий характер, є достатньо часу для прийняття рішення. До розв'язку зазначеної задачі входять наступні етапи: реалізується ФК за умови, що несправності відсутні; синтезується вторинна система обробки різницевого сигналу, завданням якої є контроль стану інноваційного процесу на предмет зміни його властивостей за рахунок впливу появи несправності; надалі проводиться її локалізація та оцінювання нанесеного збитку з метою введення в дію компенсаційних схем. Така логіка пояснюється небажанням погіршувати характеристики фільтра в режимі номінального функціонування, оскільки більшу частину часу ФК працює коректно, а корегування оцінок проводиться лише одноразово у момент часу безпосередньо за фактом виявлення несправності. Основним недоліком методу є його обчислювальна складність та особливості схем вторинної обробки. Зокрема, для одержання якісних оцінок моменту появи несправності та її розміру, ковзне вікно осереднення повинно мати відповідну ширину, що супроводжується затримкою процесу оцінювання моменту появи несправності і запізненням в уведенні компенсаційного сигналу. Ця особливість вимагає ретельного попереднього моделювання з метою забезпечення необхідного компромісу. Друга особливість стосується вибору мінімальної ширини ковзного вікна, при цьому існує можливість втрати відновлювальних властивостей системи, що унеможливить обчислення низки обернених матриць. У цьому разі доцільно знайти наближений розв'язок шляхом використання псевдообернених матриць Мура–Пенроуза, що призводить до рішення задачі оптимізації у підпросторі меншої розмірності. Формально-математична сторона синтезу за умови використання «ковзного» вікна шириною  $M$  складається з наступних кроків:

1. Для усіх  $k - M < \theta \leq k$ , слід обчислити матриці  $\Xi^{-1}[k, \tilde{\theta}]$ ,  $d[k, \tilde{\theta}]$ , які пов'язані з попередніми  $(M-1)$  ітераціями за формулами:

$$\Xi(k, \theta) = G^T(k, \theta) P^{-1}_r(k) G(k, \theta) + \Xi(k-1, \theta); \quad d(k, \theta) = G^T(k, \theta) P^{-1}_r(k) r(k) + d(k-1, \theta).$$

2. Для обчислення матриці  $G(k, \theta)$  слід користуватися формулами:

$$G(k, \theta) = H(k)[\Sigma(k, \theta) - \Sigma(k, k-1)S(k-1, \theta)], \quad S(k, \theta) = W(k)[G(k, \theta) + \Sigma(k, k-1)S(k-1, \theta)],$$

$k - M < \theta \leq k$  та  $(2M-2)$  рекурентними співвідношеннями для  $\Sigma(k, k-1)$  и  $\Theta(k, \theta)$ :

$$\Sigma(k, \theta) = \Sigma(k, k-1)\Sigma(k-1, \theta), \quad \Sigma(\theta, \theta) = I; \quad \Theta(k, \theta) = [I - W(k)H(k)]\Sigma(k, k-1)\Theta(k-1, \theta), \quad \Theta(\theta, \theta) = I$$

3. Новими елементами, необхідними для сукупності вищенаведених рівнянь є лише ті, які відповідають появі стрибка у момент часу  $k$ :

$$\Xi(k, k) = H^T(k) P^{-1}_r(k) H(k); \quad d(k, k) = H^T(k) P^{-1}_r(k) r(k); \quad \Sigma(k, k) = W(k)H(k).$$

**Оптимальні стохастичні пристрої відновлення для дискретних систем з невизначеними збуреннями та шумом** розглядаються у підрозділі 4.5, де був запропонований альтернативний метод виводу рівнянь для ФК з невизначеними входами. На відміну від відомих методів він 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. Запропонований фільтр має відносно просту структуру (табл. 5.) і дозволяє здійснювати ефективну розв'язку від присутніх збурень, при цьому виключаються надмірно складні обчислення властиві іншим методам. Вільні параметри, що залишаються після здійснення операції декомпозиції, можуть бути використані для гарантування того, що оцінювання буде виконано з мінімальною дисперсією за умови, що шум, діючий на систему має задані статистичні характеристики.

Таблиця 5

Структура фільтра для формування різницевого сигналу інваріантного до збурень

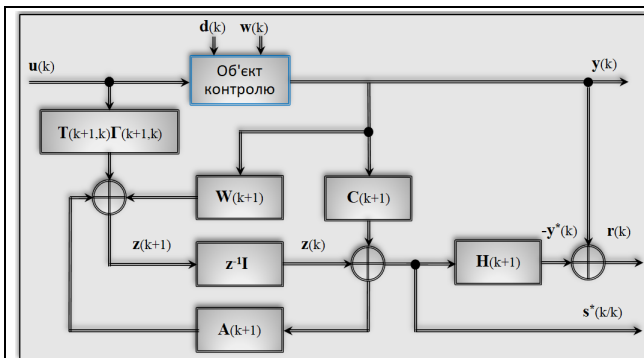


Рис. 8. Схема формування різницевого сигналу інваріантного до невизначених збурень

**Порядок синтезу фільтра**

**1. Уведення апріорних даних**

**Модель системи:**

$$s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k) + \Omega(k+1, k)d(k) + w(k);$$

$$y(k) = H(k)s(k) + v(k).$$

**Модель відновника О'Рейлі – Луенбергера:**

$$z(k+1) = A(k+1, k)z(k) + T(k+1, k)\Gamma(k+1, k)u(k) + W(k+1)y(k+1),$$

$$s^*(k+1/k+1) = z(k+1) + C(k+1)y(k+1).$$

**2. Обчислення C(k+1)**

$$C(k+1) = \Omega(k+1, k)[H(k)\Omega(k+1, k)]^{\#}.$$

**3. Обчислення матриць**

$$T(k+1), A(k+1, k), W_2(k+1)$$

$$T(k+1, k) = I - C(k+1)H(k);$$

$$A(k+1, k) = \Sigma(k+1, k)[I - C(k+1)H(k)] - W_1(k+1)H(k);$$

$$W_2(k+1) = A(k+1, k)C(k).$$

**4. Обчислення z(k+1), s^\*(k+1/k+1)**

$$z(k+1) = A(k+1, k)z(k) + T(k+1, k)\Gamma(k+1, k)u(k) + W(k+1)y(k+1),$$

$$s^*(k+1/k+1) = z(k+1) + C(k+1)y(k+1)$$

**4. Обчислення P^{(k+1/k+1)}**

$$P_1^{(k+1/k+1)} = P^{(k/k)} - W_1(k+1)H(k)P^{(k/k)}\Sigma_1^T(k+1, k).$$

$$P^{(k+1/k+1)} = \Sigma_1(k+1, k)P_1^{(k+1/k+1)}\Sigma_1^T(k+1, k) + T(k+1, k)\Omega(k)T^T(k+1, k) +$$

$$C(k+1)R(k+1)C^T(k+1).$$

**5. Надаємо нове значення k = k + 1 і переходимо до кроку 2**

Необхідні та достатні умови існування синтезованого фільтра та його оптимальність визначаються теоремою 2:

**Теорема 2.** *Похибка оцінювання  $\Delta s(k+1)$  досягає мінімального значення тоді, коли матриця передачі  $W_1(k+1)$  буде визначатись рівнянням*

$$W_1(k+1) = \Sigma_1(k+1, k) P(\frac{k}{k}) H^T(k) [H(k) P(\frac{k}{k}) H^T(k) + R(k)]^{-1}. \quad (3)$$

У п'ятому розділі – «Ідентифікація несправностей методами локально оптимального роздільного оцінювання» розглядається низка задач, поєднаних спільною метою – сукупного оцінювання станів лінійних стохастичних систем та супутніх несправностей за наявності збурень, структура яких вважається невизначеною. У змістовному плані розділ побудовано на основі використання результатів фундаментальних робіт Фрідланда та Кітанідіса та низки авторських публікацій. У підрозділі 5.1 виконаний аналіз літературних джерел з метою з'ясування сутності існуючих базових методів синтезу різновидів ФК інваріантних до супутніх збурень з невизначеною структурою. Зокрема, Кітанідіс був першим хто отримав лінійні незміщені оцінки з мінімальною узагальненою дисперсією за рахунок уведення обмежень, що накладались системні матриці. Дораух та ін. узагальнили результати Кітанідіса, застосувавши при цьому параметричний підхід для отримання оптимальних оцінок. Лю та Сі у межах геометричного підходу запропонували відновник повного порядку, здатний виявляти та розпізнавати множинні несправності в лінійних динамічних системах неперервного часу. Матриця передачі відновника вибиралась так, щоб кожен елемент векторного різницевого сигналу був пов'язаним лише з однією конкретною несправністю, і у той же час був розв'язаним від інших типів несправностей із апріорі заданої множини. В роботі *цей метод було адаптовано до лінійної дискретної системи*, що зазнає впливу множинних несправностей та (або) збурень, структура яких є невизначеною. Задача синтезу виконана для двох варіантів постановки задачі: детермінованої та стохастичної. Результат синтезу представлений у вигляді структури, що складається з двох незалежно працюючих фільтрів калманівського типу, кожен з яких використовує процедуру розщеплення різницевого сигналу і має розмірність нижчу за розмірність досліджуваної системи. Перший з них обчислює оцінку вектора стану системи без урахування впливу несправностей, а інший, виродженого типу, виконує оцінку несправностей у неявній формі. На відміну від фільтра Кітанідіса, розщеплення відбувається до процесу оцінювання, що дає змогу отримати певну економію обчислювальних ресурсів за рахунок низки маніпуляцій з результатами спостережень: визначення індексу виявлення несправностей, формування локальних матриць виявлення та групування несправностей за порядком їх індексу виявлення. Проте, зазначена перевага досягається уведенням додаткових обмежень, зокрема, наявності у проектувальника фіксованого об'єму результатів спостережень, який можна отримувати шляхом виконання стендових або льотних випробувань. З метою подолання зазначеного недоліку автором для систем реального часу *запропоновано фільтр, що не використовує елементів геометричного підходу*. При цьому передбачається, що модель системи з супутніми збуреннями та несправностями, структура яких апріорі невідома, на відміну від

моделі Кітанідіса є більш розширеною і враховує несправності, що одночасно впливають, як на стан системи, так і на вихідні змінні, а збурення – лише на змінні стану. Порядок синтезу запропонованого фільтра представлено у зведених таблиці 6.

Таблиця 6.

Зведена таблиця формул роздільного оцінювання

Математична модель системи з супутніми несправностями та збуреннями $s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k) + \Psi(k+1, k)f(k) + \Omega(k+1, k)d(k) + w(k);$ $y(k) = H(k)s(k) + F(k)f(k) + v(k)$	
Оцінювання несправностей $W(k) \triangleq H(k)\bar{P}_s(k/k-1)H^T(k) + R(k)$	
$rank[F(k)] = p$	$1 < rank[F(k)] < p$
$G(k) = [F(k) \ H(k)\Omega(k, k-1)]; \Phi(k) = [I_p \ 0];$ $G^*(k) = [G^T(k)W^{-1}(k)G(k)]^{-1}G^T(k)W^{-1}(k);$ $K_f(k) = \Phi(k)G^*(k)$	$\Xi(k-1) = [I - F^\#(k-1)F(k-1)]; \Phi(k) = I_p - \Xi(k);$ $\bar{G}(k) = [F(k) \ H(k)\Psi(k, k-1)\Xi(k-1) \ H(k)\Omega(k, k-1)]$ $\bar{\Phi}(k) = [\Phi(k) \ 0 \ 0]; K_f(k) = \bar{\Phi}(k)\bar{G}^*(k);$ $\bar{G}^*(k) = [\bar{G}^T(k)W^{-1}(k)\bar{G}(k)]^\# \bar{G}^T(k)W^{-1}(k).$
$\hat{f}(k/k) = K_f(k)[y(k) - H(k)\hat{s}(k/k-1)]; \ P_f(k/k) = K_f(k)W(k)K_f^T(k).$	
Оцінювання вектора стану	
$rank[F(k)] = p$	$1 < rank[F(k)] < p$
$K_s(k) = \bar{P}_s(k/k-1)H^T(k)W^{-1}(k)[I - G(k)G^*(k)] + Z(k)G^*(k)$ $Z(k) = [0 \ \Omega(k, k-1)].$	$\bar{Z}(k) = [0 \ \Psi(k, k-1)\Xi(k-1) \ \Omega(k, k-1)]$ $K_s(k) = \bar{P}_s(k/k-1)H^T(k)W^{-1}(k)[I - \bar{G}(k)\bar{G}^*(k)] + \bar{Z}(k)\bar{G}^*(k)$
$\hat{s}(k/k) = \hat{s}(k/k-1) + K_s(k)[y(k) - H(k)\hat{s}(k/k-1)];$ $P_s(k/k) = [I - K_s(k)H(k)]\bar{P}_s(k/k-1)[I - K_s(k)H(k)]^T + K_s(k)R(k)K_s^T(k);$ $P_{sf}^*(k/k) = -[I - K_s(k)H(k)]\bar{P}_s(k/k-1)H^T(k)K_f^T(k) + K_s(k)R(k)K_f^T(k).$	
Корегування фільтра у часі	
$\hat{s}(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\hat{s}(k-1/k-1) + \Gamma(k, k-1)u(k-1) + \Psi(k, k-1)\hat{f}(k-1/k-1);$ $\bar{P}_s(k/k-1) = [\Sigma(k, k-1) \ \Psi(k, k-1)] \begin{bmatrix} P_s(k-1/k-1) & P_{sf}(k-1/k-1) \\ P_{fs}(k-1/k-1) & P_f(k-1/k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma^T(k, k-1) \\ \Psi^T(k, k-1) \end{bmatrix} + Q(k-1).$	

Для відокремлення оцінок векторів стану  $\hat{s}(k/k)$  та несправностей  $\hat{f}(k/k)$  від вектора збурень була застосована процедура декомпозиції, ( $rank[H(k)\Omega(k, k-1)] = rank[\Omega(k, k-1)] = q$ ), що дозволило розщепити результуючий фільтр на дві складові. Перша з них оцінює вектор стану системи, ігноруючи при цьому вплив діючих несправностей, а друга за таких же умов, оцінює лише несправності. При цьому справедливі співвідношення:

$$\hat{s}(k/k) = \hat{s}(k/k-1) + K_s(k)[y(k) - H(k)\hat{s}(k/k-1)]; \quad \hat{f}(k/k) = K_f(k)[y(k) - H(k)\hat{s}(k/k-1)];$$

$$\hat{s}(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\hat{s}(k-1/k-1) + \Gamma(k, k-1)u(k-1) + \Psi(k, k-1)\hat{f}(k-1/k-1), \quad (4)$$

де останнє рівняння описує функцію об'єднаного екстраполятора. Таким чином, задача синтезу звелась до вибору таких значень матриць передачі розділе-

них фільтрів  $K_s(k) \in \mathcal{R}^{n \times m}$  та  $K_f(k) \in \mathcal{R}^{p \times m}$ , які б відповідали вибраним критеріям якості, а саме відсутності зсувів у отриманих оцінках  $\hat{s}(k/k)$ ,  $\hat{f}(k/k)$  та мінімальності сліду коваріаційних матриць похибок оцінювання  $\min tr[P_f(k/k)]$ ,  $\min tr[P_s(k/k)]$ . Синтез фільтра здійснено методом зважених найменших квадратів, а до процедури мінімізації долучались елементи варіаційного числення, зокрема метод векторних множників Лагранжа. У тому випадку, коли матриця розподілу несправностей у підсистемі спостережень мала довільний ранг, тобто  $l < \text{rank}[F(k)] < p$ , розширення функціональних можливостей фільтра досяглось за рахунок уведення додаткових обмежень на системні матриці, а оптимізація виконувалась у просторі меншої розмірності, оскільки не усі моди можуть бути відновленими за результатами виконаних спостережень. Причому не відновлювані моди повинні залишатись у класі стійких мод, у противному разі фільтр не може бути практично реалізованим.

Заключна частина розділу присвячена методам синтезу фільтрів розщепленого типу, які роздільно оцінюють, як стан системи, так і вектори попутно діючих несправностей за умови наявності їх математичних моделей. Синтез фільтрів виконувався на основі використання модифікованої концепції Фрідланда. Оскільки оригінальна структура, запропонована Фрідландом, виявилась еквівалентною РФК лише для детермінованих моделей несправностей та збурень, то спроби розповсюдити її на стохастичні моделі наштовхувались на значні труднощі через уведення низки жорстких обмежень, які виконати на практиці було майже неможливо. Суть *запропонованого* методу зводилась до модернізації структури Фрідланда шляхом відмови від автономності роботи компонентів паралельної структури та охопленні їх системою перехресних зв'язків. Ці заходи дозволили послабити обмеження до рівня прийняттого з практичної точки зору та отримати локально-оптимальні характеристики розщепленого фільтра за наявності стохастичних моделей несправностей. Формально-математична сторона синтезу структури розщеплених фільтрів заснована на застосуванні двох крокового ортогонального перетворення до розширеного фільтра Калмана, яке приводило коваріаційні матриці похибок екстраполяції  $P_z(k/k-1)$  та фільтрації  $P_z(k/k)$  до діагонального вигляду. Локальна оптимальність та збіжність оцінок синтезованого фільтра у сенсі мінімальності середньоквадратичної похибки значною мірою залежать від коваріаційної матриці оновленого шуму  $Q_{s1}(k)$ . Вона повинна залишатись під постійним контролем протягом усієї роботи фільтра, бути симетричною та невід'ємно означеною, що гарантуватиме збіжність процесу фільтрації. З практичної точки зору це обмеження виконати легше за тих, що уведені у загальновідомих роботах. Нижче наводиться таблиця операторів синтезованої процедури.

Після з'ясування механізму роботи локально-оптимального розщепленого фільтра розгляду підлягала більш складна та практично значима задача, коли несправності та збурення діють одночасно не тільки у підсистемі «об'єкт-регулятор», а також у каналі спостережень.

## Порядок реалізації процедури розщеплення розширеного фільтра Калмана

<b>Математична модель системи</b>	
$s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Psi(k+1, k)f(k) + w_s(k); \quad f(k+1) = L(k+1, k)f(k) + w_f(k); \quad y(k) = H(k)s(k) + F(k)f(k) + v(k)$	
<b>Підсумкові оцінки та їх точність</b>	
$\hat{s}^{(k/k-1)} = s_1^*(k/k-1) + U(k)f^*(k/k-1);$	$\hat{s}^{(k/k)} = s_1^*(k/k) + V(k)f^*(k/k);$
$\hat{P}_s^{(k/k-1)} = \begin{bmatrix} P_{s_1}^*(k/k-1) + U(k)P_f^*(k/k-1)U^T(k); & U(k)P_f^*(k/k-1) \\ P_f^*(k/k-1)U^T(k); & P_f^*(k/k-1) \end{bmatrix};$	$\hat{P}_s^{(k/k)} = \begin{bmatrix} P_{s_1}^*(k/k) + V(k)P_f^*(k/k)V^T(k); & V(k)P_f^*(k/k) \\ P_f^*(k/k)V^T(k); & P_f^*(k/k) \end{bmatrix};$
<b>Модифікований фільтр для оцінювання <math>S_1^*</math></b>	
$s_1^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)s_1^*(k-1/k-1) + u(k-1);$	
$P_{s_1}^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)P_{s_1}^*(k-1/k-1)\Sigma(k, k-1)^T + Q_{s_1}^*(k-1);$	
$K_{s_1}^*(k) = [H(k)P_{s_1}^*(k/k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1};$	$P_{s_1}^*(k/k) = [I - K_{s_1}^*(k)H(k)]P_{s_1}^*(k/k-1);$
$r_{s_1}^*(k) = y(k) - H(k)s_1^*(k/k-1);$	$s_1^*(k/k) = s_1^*(k/k-1) + K_{s_1}^*(k)r_{s_1}^*(k).$
<b>Фільтр для оцінювання несправностей <math>f^*</math></b>	
$f^*(k/k-1) = L(k, k-1)f^*(k-1/k-1);$	$P_f^*(k/k-1) = L(k, k-1)P_f^*(k-1/k-1)L(k, k-1)^T + Q_f(k-1);$
$K_f^*(k) = P_f^*(k/k-1)\Theta^T(k)[H(k)P_{s_1}^*(k/k-1)H(k)^T + R(k) + \Theta(k)P_f^*(k/k-1)\Theta^T(k)]^{-1};$	$P_f^*(k/k) = [I - K_f^*(k)\Theta(k)]P_f^*(k/k-1);$
$r_f^*(k) = r_{s_1}^*(k) - \Theta(k)f^*(k/k-1);$	$f^*(k/k) = f^*(k/k-1) + K_f^*(k)r_f^*(k)$
<b>Рівняння для матриць спряження</b>	
$\tilde{U}(k) = [\Sigma(k, k-1)V(k-1) + \Psi(k, k-1)]L^{-1}(k, k-1);$	$U(k) = \tilde{U}(k)[I - Q_f(k-1)[P_f^*(k/k-1)]^{-1}];$
$V(k) = U(k) - K_{s_1}^*(k)\Theta(k);$	$Q_{s_1}(k) = Q_s(k) + U(k+1)Q_f(k)\tilde{U}(k+1);$
	$u(k) = [\tilde{U}(k+1) - U(k+1)]L^{-1}(k, k-1)f^*(k/k)$
<b>Початкові умови</b>	
$V(0) = P_{s_1}(0)[P_f(0)]^{-1};$	$s_1(0) = \bar{s}_0 - V(0)\bar{f}_0; \quad f^*(0) = \bar{f}_0; \quad P_f^*(0) = P_f(0); \quad P_{s_1}^*(0) = P_s(0) - V(0)P_f(0)V(0)^T.$

Поставленій задачі відповідає математична модель:

$$s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k) + \Psi(k+1, k)f(k) + \Omega(k+1, k)d(k) + w_s(k),$$

$$y(k) = H(k)s(k) + F(k)f(k) + D(k)d(k) + v(k).$$

При цьому структура синтезованого фільтра визначалась системою різницевої рівнянь:  $\hat{s}^{(k/k)} = s^*(k/k) + V_{12}(k)f^*(k/k) + V_{13}(k)d^*(k/k); \quad \hat{f}^{(k/k)} = f^*(k/k) + V_{23}(k)d^*(k/k)$ , де символ  $\hat{\phantom{x}}$  відноситься до загальної підсумкової оцінки, а символ  $^*$  – до оцінки розщепленого типу.

Для того щоб система за наявності несправностей та збурень залишалась у межах керованості та відновлюваності були введені додаткові обмеження:  $[\Sigma(k+1, k), H(k)]$  – відновлювана пара;  $rank[H(k)\Psi(k, k-1)] = rank[\Psi(k, k-1)];$   $rank[H(k)\Omega(k, k-1)] = rank[\Omega(k, k-1)];$   $m \geq p+q$ . Уведені рангові обмеження гарантували розщеплення РФК на три допоміжні структури–фільтри меншої розмірності, які у сукупності були б еквівалентними РФК. З цією метою була застосована пара розширених двох крокових ортогональних перетворень для приведення коваріаційних матриць похибок екстраполяції  $P_{zz}(k/k-1)$  та фільтрації  $P_{zz}(k/k)$  до діагонального вигляду. Оскільки структура фільтра певною мірою була визна-

чена уведеними ранговими обмеженнями, то задача синтезу полягала у виборі матричних коефіцієнтів передачі  $K_s^*(k)$ ,  $K_f^*(k)$ ,  $K_d^*(k)$  та вагових множників  $V_{12}$ ,  $V_{13}$ ,  $V_{23}$ , здатних забезпечити мінімальне значення середньоквадратичної похибки у межах дії уведених обмежень. Саме з цієї причини автор відносить зазначену структуру до *категорії локально-оптимальних*. Слід зауважити, що оптимальність запропонованої структури потребує високоякісної моделі у сенсі точності завдання апріорних значень її параметрів, що на практиці зустрічається надзвичайно рідко. Проте незалежно від значень локальних матриць передачі  $K_s^*(k)$ ,  $K_f^*(k)$ ,  $K_d^*(k)$  та вагових множників  $V_{12}(k)$ ,  $V_{13}(k)$ ,  $V_{23}(k)$  роздільна форма розширеного фільтра визначається уведеними ранговими обмеженнями і зберігається інваріантною до неповного завдання апріорних даних або навіть їх відсутності. Це дає змогу наповнювати вищезазначену роздільну форму іншим змістом в залежності від прийнятого критерію, наприклад, можна вимагати відсутності зсувів у отриманих оцінках, мінімізації сліду коваріаційної матриці, або робастної структури розщепленого фільтра. Саме останньому варіантові – *робастній структурі* розщепленого фільтра присвячені заключні підрозділи цього розділу. Зокрема, у підрозділі 5.6.2 була синтезована робастна структура РФК, якій притаманні ознаки стійкості роздільних оцінок вектора стану системи та супутніх несправностей щодо збурень невідомої структури. Спочатку розглядався спрощений варіант моделі, у якому несправності та збурення мають місце лише у підсистемі «об'єкт–регулятор», тобто передбачається, що  $F(k) = D(k) = \mathbf{0}$ . Розгляд узагальненого варіанту було відкладено до фінальної частини розділу – підрозділу 5.6.3. Таким чином, укорочена модель системи мала вигляд:

$$\begin{aligned} s(k+1) &= \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k) + \Psi(k+1, k)f(k) + \Omega(k+1, k)d(k) + w_s(k), \\ y(k) &= H(k)s(k) + v(k). \end{aligned} \quad (5)$$

Синтез фільтра виконувався шляхом модифікації рівнянь спостережень для фільтрів, призначених виключно для роздільного оцінювання несправностей  $f^*(k/k)$  та збурень  $d^*(k/k)$  за умови дії обмежень  $F(k) = D(k) = \mathbf{0}$ . Суть модифікації зводилась до отримання скорегованих значень локальних матричних коефіцієнтів передачі  $K_f^*(k)$  та формуванні розділених оцінок несправностей та супутніх збурень:

$$\begin{aligned} f^*(k/k) &= [I - K_f^*(k)\mathcal{E}_2(k)]f^*(k/k-1) + K_f^*(k)[y(k) - \mathcal{E}_1(k)s^*(k/k-1)], \\ d^*(k/k) &= [I - K_d^*(k)\mathcal{E}_3(k)]d^*(k/k-1) + K_d^*(k)[y(k) - \mathcal{E}_1(k)s^*(k/k-1) - \mathcal{E}_2(k)f^*(k/k-1)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки несправності та збурення інтерпретуються як довільні функції часу, динаміка яких невизначена, то усунення залежності оцінок  $f^*(k/k)$ ,  $d^*(k/k)$  від їх екстрапольованих значень  $f^*(k/k-1)$ ,  $d^*(k/k-1)$  виконувалось шляхом введення обмежень:  $[I - K_f^*(k)\mathcal{E}_2(k)] = \mathbf{0}$ ;  $[I - K_d^*(k)\mathcal{E}_3(k)] = \mathbf{0}$ ;  $K_d^*(k)\mathcal{E}_2(k) = \mathbf{0}$

Окрім того, стійкість розщепленого фільтра до впливу невизначених збурень та несправностей досягалась за рахунок усунення залежностей оцінок від сигналів поправок, тобто  $\tilde{u}_1(k-1) = \tilde{u}_2(k-1) = \mathbf{0}$ . Дотримання цих вимог дозволило

встановити спрощені взаємозв'язки поміж елементами уведених ортогональних матричних  $U$ – $V$  перетворень. Порядок синтезу робастного фільтра регламентовано табл. 8.

Таблиця 8

## Порядок виконання синтезу робастного розщепленого фільтра Калмана

<b>1. Математична модель системи</b>	
$s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k) + \Psi(k+1, k)f(k) + \Omega(k+1, k)d(k) + w_s(k); \quad y(k) = H(k)s(k) + v(k).$	
<b>2. Підсумкові оцінки та їх точність</b>	
$\hat{s}(k/k) = s^*(k/k) + V_{12}(k)f^*(k/k) + V_{13}(k)d^*(k/k);$	
$\hat{P}_{ss}(k/k) = P_{ss}^*(k/k) + V_{12}(k)P_{ff}^*(k/k)V_{12}^T(k) + V_{13}(k)P_{dd}^*(k/k)V_{13}^T(k);$	
$\hat{f}(k/k) = f^*(k/k) + V_{23}(k)d^*(k/k); \quad \hat{P}_{ff}(k/k) = P_{ff}^*(k/k) + V_{23}(k)P_{dd}^*(k/k)V_{23}^T(k).$	
<b>3. Розщеплені оцінки вектора стану системи <math>s(k)</math></b>	
$s^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\hat{s}(k-1/k-1) + \Gamma(k, k-1)u(k-1);$	
$P_{ss}^*(k/k-1) = \Sigma(k, k-1)\hat{P}_{ss}(k-1/k-1)\Sigma^T(k, k-1) + Q_s(k-1);$	
$W(k) \triangleq H(k)P_{ss}^*(k/k-1)H^T(k) + R(k); \quad K_s^*(k) = P_{ss}^*(k/k-1)H^T(k)W^{-1}(k);$	
$s^*(k/k) = s^*(k/k-1) + K_s^*(k)[y(k) - H(k)s^*(k/k-1)]; \quad P_{ss}^*(k/k) = [I - K_s^*(k)H(k)]P_{ss}^*(k/k-1).$	
<b>4. Розщеплені оцінки вектора несправностей <math>f(k)</math></b>	
$\mathcal{E}_2(k) = H(k)U_{12}(k) = H(k)\Psi(k, k-1); \quad P_{ff}^*(k/k) = [\mathcal{E}_2^T(k)W^{-1}(k)\mathcal{E}_2(k)]^\#;$	
$K_f^*(k) = P_{ff}^*(k/k)\mathcal{E}_2^T(k)W^{-1}(k); \quad f^*(k/k) = K_f^*(k)[y(k) - H(k)s^*(k/k-1)].$	
<b>5. Розщеплені оцінки вектора збурень <math>d(k)</math></b>	
$U_{13}(k) = \Omega(k, k-1) + \Psi(k, k-1)V_{23}(k-1); \quad \mathcal{E}_3(k) = H(k)U_{13}(k);$	
$P_{dd}^*(k/k) = [\mathcal{E}_3^T(k)W^{-1}(k)\mathcal{E}_3(k)]^\#;$	
$K_d^*(k) = P_{dd}^*(k/k)\mathcal{E}_3^T(k)W^{-1}(k)\alpha(k)[I - \mathcal{E}_2(k)\mathcal{E}_2^\#(k)];$	
$d^*(k/k) = K_d^*(k)[y(k) - H(k)s^*(k/k-1)].$	
<b>6. Розрахунок матричних вагових коефіцієнтів <math>V_{12}(k), V_{13}(k), V_{23}(k)</math></b>	
$V_{12}(k) = \Psi(k, k-1) - K_s^*(k)\mathcal{E}_2(k);$	
$V_{13}(k) = \Omega(k, k-1) - K_s^*(k)H(k)\Omega(k, k-1) + V_{12}(k)V_{23}(k);$	
$V_{23}(k) = -K_f^*(k)H(k)\Omega(k, k-1); \quad V_{23}(0) - \text{задається користувачем.}$	

**Синтез розширеного варіанту робастного фільтра Калмана** виконувався у припущенні, що матриці  $F(k), D(k)$  у математичній моделі каналу спостережень були відмінні від нуля, тобто  $y(k) = H(k)s(k) + F(k)\tilde{f}(k) + D(k)\tilde{d}(k) + v(k)$ .

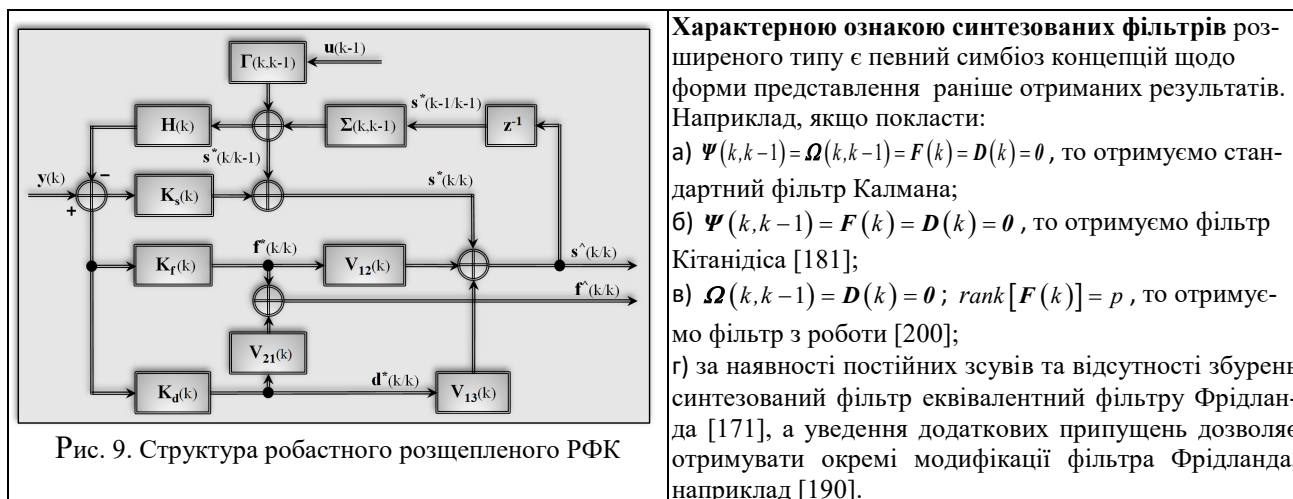
Символи  $\tilde{f}(k)$  та  $\tilde{d}(k)$  означали, що вектори несправностей та збурень у каналі спостережень і у підсистемі «об'єкт–регулятор»  $f(k), d(k)$  не є ідентичними. Для того, щоб можна було скористатись результатами попередніх підрозділів, заснованих раніше уведених використовувались розширені вектори несправностей та збурень  $f_p^T(k) \triangleq [\tilde{f}(k), f(k)]^T; \quad d_p^T(k) \triangleq [\tilde{d}(k), d(k)]^T$ , що дало змогу записати математичну модель системи у раніше наведеній формі:

$$s(k+1) = \Sigma(k+1, k)s(k) + \Gamma(k+1, k)u(k) + \overline{\Psi}(k+1, k)f_p(k) + \overline{\Omega}(k+1, k)d_p(k) + w_s(k), \quad (7)$$

$$y(k) = H(k)s(k) + \overline{F}(k)f_p(k) + \overline{D}(k)d_p(k) + v(k). \quad (8)$$



У цілому розширений робастний фільтр Калмана розщепленого типу (рис. 9) було отримано за безпосереднього використання результатів з підрозділу 5.6.2.



Характерною ознакою синтезованих фільтрів розширеного типу є певний симбіоз концепцій щодо форми представлення раніше отриманих результатів. Наприклад, якщо покласти:

- $\Psi(k, k-1) = \Omega(k, k-1) = F(k) = D(k) = \theta$ , то отримуємо стандартний фільтр Калмана;
- $\Psi(k, k-1) = F(k) = D(k) = \theta$ , то отримуємо фільтр Кітанідіса [181];
- $\Omega(k, k-1) = D(k) = \theta$ ;  $rank[F(k)] = p$ , то отримуємо фільтр з роботи [200];
- за наявності постійних зсувів та відсутності збурень синтезований фільтр еквівалентний фільтру Фрідланда [171], а введення додаткових припущень дозволяє отримувати окремі модифікації фільтра Фрідланда, наприклад [190].

Слід зазначити, що у фільтрів, що формують роздільні оцінки несправностей  $f^*(k/k)$  та збурень  $d^*(k/k)$  відсутня частина, що пов'язана з екстраполятором. Це пояснюється відсутністю будь-якої апріорної інформації щодо структури процесів  $f(k)$  та  $d(k)$ , оскільки вони представлені довільними функціями часу. Вищезазначені фільтри є виродженими, а їх полюси знаходяться у початку координат.

У шостому розділі – «Практичний аспект теорії функціонального захисту від порушень працездатності на прикладі радіотехнічної системи посадки сантиметрового діапазону» виконувались дослідження з метою наповнення фактичним матеріалом основних положень теоретичних розділів 3–5 на прикладі інструментальної системи посадки ПС, яка у межах ICAO отримала офіційну назву Microwave Landing System (MLS). Зокрема: перевірки адекватності запропонованих математичних моделей несправностей; оцінки ефективності розроблених методів оцінювання вектора стану посадкової системи за умови послаблення впливів несправностей, як у каналі спостережень так і у підсистемах об'єкта керування; збору статистичних даних щодо втрати працездатності кутомірною підсистемою унаслідок пропусків або хибних декодувань кутових функцій з наступним їх використанням у якості науково обґрунтованих апріорних даних, необхідних для коректної роботи алгоритмів фільтрації підвищеної стійкості до дії аномальних похибок у каналах спостережень. Основні результати отримані у цьому розділі зводяться до наступного:

1. Визначено місце посадкової системи у складі пілотажно-навігаційного комплексу та показана її визначальна роль.

2. На основі аналізу архітектури системи MLS та методу первинних вимірювань кутових координат ПС (рис.10) розглянуті варіанти розгортання посадкового обладнання на місцевості різної комплектності. Зокрема, у тому разі коли ЗПС допускає посадку ПС з обох напрямків, автором у межах регламентованих норм запропонований спосіб розгортання кутового обладнання на місцевості, який не погіршує тактико-технічні характеристики посадкової системи і в той же час сприяє розвантаженню диспетчерської служби аеропорту від над-

лишкової інформації, що висвітлюється на екранах індикаторних пристроїв. Пріоритет способу та його новизна захищені патентом України.

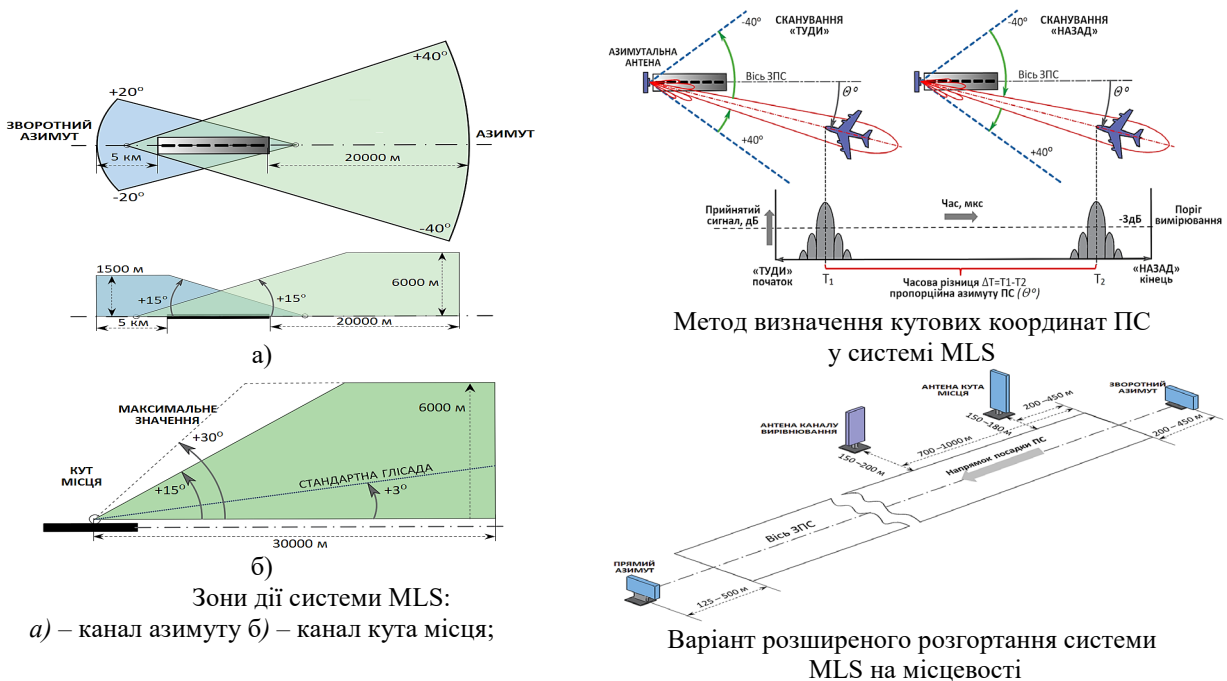


Рис. 10. Архітектура посадкової системи MLS та метод визначення кутових координат ПС

3. Виконано аналіз потенційної точності первинних кутових вимірювань на борту ПС. Дана оцінка впливу флуктуаційних шумів та сукупності хаотично-імпульсних перешкод на точність бортових вимірювань. *Запропонований метод покращення інструментальної точності* вимірювань кутових координат на борту ПС, сутність якого полягає у поєднанні використання каналу прямого доступу до оперативної пам'яті мікро-ЕОМ з методом формування центра ваги кутових сигналів шляхом вагового осереднення сукупності відліків АЦП. Завдяки цьому досягається майже *трикратне* підвищення інструментальної точності кутових вимірювань та зростає рівень технологічності.

4. Згідно регламентованих норм посадка ПС здійснюється шляхом виконання низки етапів у певній послідовності (рис.11).

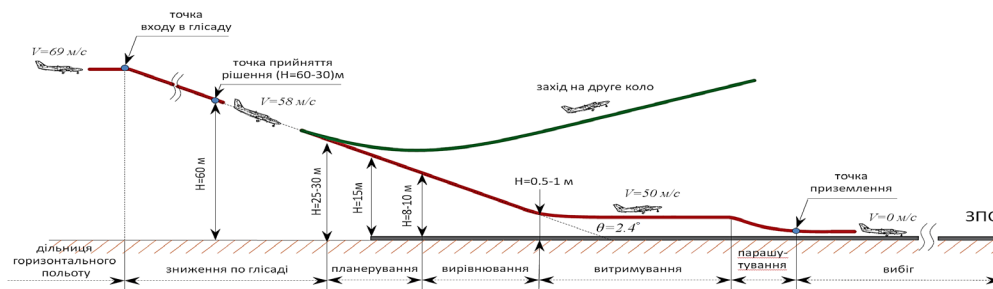


Рис. 11. Типова схема посадки для ПС середнього класу

Проте у будь-якому разі, ефективне керування польотом ПС передбачає використання апріорно заданої номінальної математичної моделі ПС як об'єкта керування. Окрім того, номінальна математична модель об'єкта керування є опорним елементом при побудові моделей динамічних систем, що зазнають впливу збурень або несправностей. Для найбільш відповідальних етапів посадкового маневру планерування та вирівнювання *розроблені математичні моделі*

короткоперіодичної складової поздовжнього руху ПС, параметри яких вибрано за критерієм Купера–Харпера, а саме:  $\xi_g = 0.6$ ;  $T_0 = 3,5c$ ;  $T_g = 3,1c$ ;  $K_g = 1,8 c^{-1}$ .

5. Виконано порівняльний аналіз (рис.12) ефективності запропонованих методів фільтрації різного ступеня точності та стійкості до порушень працездатності каналу спостережень виконувався для ділянки планування ПС.

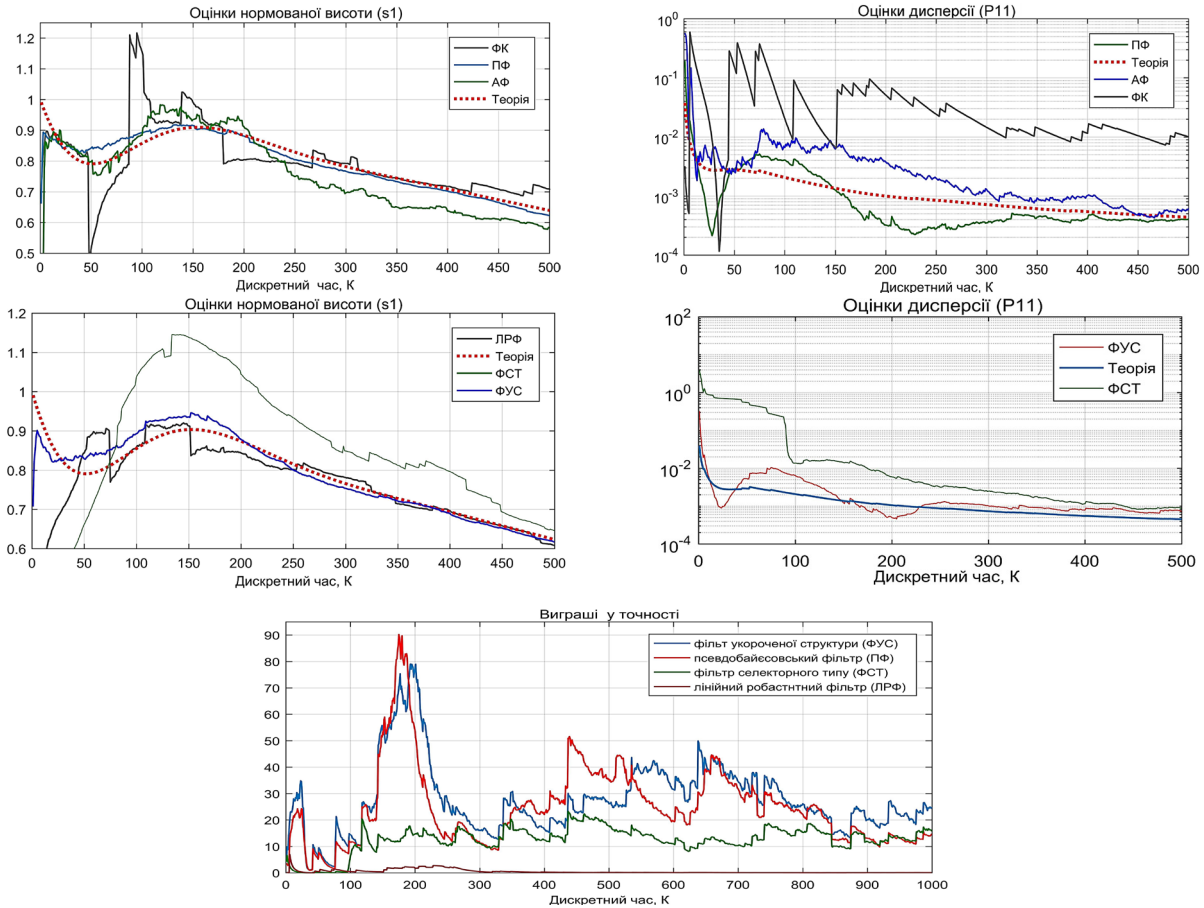


Рис. 12. Результати порівняльного аналізу оцінювання нормованої висоти ПС

Це дозволило надати науково обґрунтовані рекомендації, що стосуються вибору найбільш прийнятної за ефективністю структури пристрою обробки посадкових даних за критерієм «точність – достовірність – обчислювальні витрати». За результатами аналізу їх можна розташувати у такому ієрархічному порядку:

5.1. Процедура формування псевдобайесових зважених оцінок забезпечила найкращі показники якості з точки зору захисту від впливу аномалій у каналі спостережень, а виграш у точності оцінювання висоти порівняно з ФК складає: у перехідному режимі ( для  $k = 0 \div 200$ ) близько двох порядків; в усталеному режимі для  $k \geq 300$  величина виграшу сягає до 10–25 разів.

5.2. Адаптивний фільтр формує оцінки висоти, які на етапі самонавчання програють у точності псевдобайесовим оцінкам приблизно удвічі, проте по закінченні цієї фази їх показники точності майже співпадають. Однак, практична реалізація адаптивної схеми оцінювання потребує маже на порядок більших обчислювальних ресурсів. Основною причиною є апроксимація густини розподілу  $\pi[q_i/Y_1^k]$  на інтервалі  $[0,1]$  достатньою кількістю дискретних рівновіддалених точок, яка у даному випадку приймалась рівною п'ятдесяти.

5.3. Робастний фільтр укороченої структури (ФУС) за умови  $\varphi_N(k) \gg 1$  здатен забезпечити якісні показники, що на 30–40% поступаються показникам якості псевдобайєсової структури. У перехідному режимі діапазон виграшу у точності порівняно з ФК сягає від 20 до 70 разів, а в усталеному – до 20 разів.

5.4. Робастний фільтр селекторного типу (ФСТ) здатен гарантувати виграш у точності оцінювання по відношенню до ФК приблизно у 12–15 разів незалежно від режиму роботи фільтра.

5.5. Робастний фільтр лінійного (ЛРФ) типу надає мінімально можливі можливості захисту від впливу аномалій лише у тій частині фільтраційного процесу, яка узгоджена з апіорними даними. Даний фільтр, у кращому випадку, може забезпечити виграш у точності порівняно з ФК у межах від 2 до 5 разів.

5.6. Стандартний фільтр Калмана випадає з даного ряду, оскільки він розрахований на номінальну модель каналу спостережень, в зв'язку з цим у ньому відсутній механізм захисту від впливу аномальних похибок.

Об'єм обчислювального ресурсу, необхідного для реалізації запропонованих методів фільтрації підвищеної надійності, у першому наближенні, оцінювався числом виконуваних множень та додавань. Результати розрахунків показують, що усі фільтри підвищеної надійності, за винятком адаптивного, потребують приблизно однакового розміру обчислювальних витрат. Поєднання цих результатів з номограмами виграшу у точності оцінювання за наявності аномалій дозволяє науково обґрунтовано надавати у руки проектувальника набір алгоритмів високнадійної фільтрації з урахуванням вимог для кожного, окремо взятого випадку.

6. Порівняльний аналіз ефективності методів роздільної фільтрації різного ступеня точності та стійкості до несправностей у підсистемі «об'єкт – регулятор» виконувався для фінального етапу посадкового маневру – вирівнюванні з метою наповнення фактичними даними теоретичних результатів 5 розділу. За основу аналізу була взята різниця між фактичним виходом динамічної системи та його оцінкою, отриманою за допомогою розробленої математичної моделі. У випадку адекватності моделі залишковий різницевий сигнал дорівнює нулю, у протилежному разі усі невраховані зміни віддзеркалюються саме у різницевому сигналі. Вірогідними причинами таких змін є шуми, збурення та несправності. Шуми можна послабити за рахунок частотної фільтрації. Стосовно супутніх збурень залишається єдиний шлях – їх відокремлення від сигналу несправностей декомпозиція. У якості роз'єднувальних фільтрів використовувались стандартний ФК, модифікований фільтр Калмана з невизначеними входами (МФК), основою якого є топологія Кітанідіса, та модифікований локально оптимальний фільтр Фрідланда (МФФ). Результати моделювання (рис. 13) роботи ФК показали його неспроможність усунути залежність отриманих оцінок від впливу несправностей. Наслідком є розбіжність процесу фільтрації та неможливість розрізнення сигналу несправності на фоні шумів.

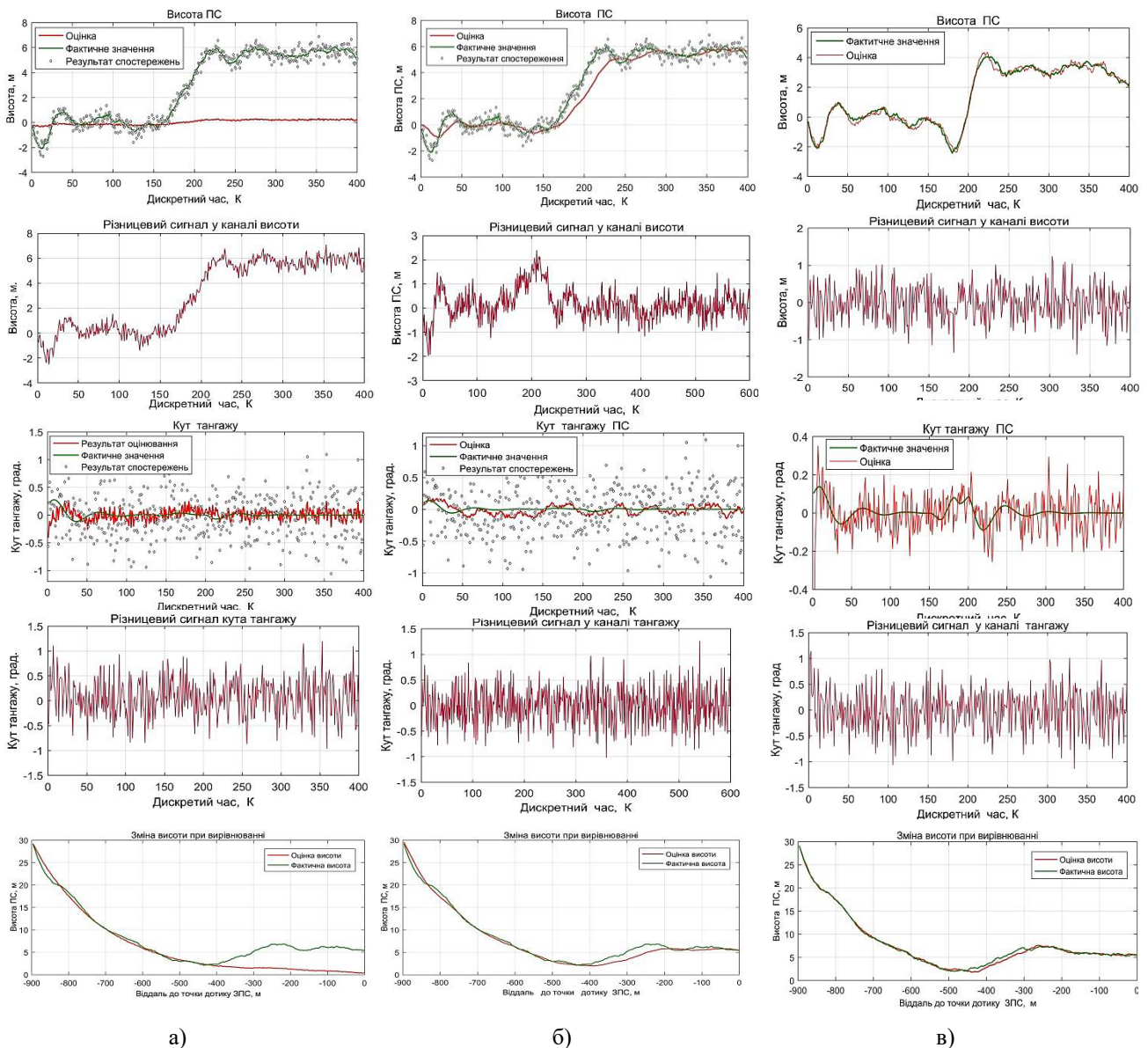


Рис. 13. Результати оцінювання параметрів посадкової траєкторії: а) стандартний ФК; б) МФК з невизначеними входами; в) модифікований фільтр Фрідланда

З рис. 13а видно, що у даному випадку фактична висота не відстежується, а процес фільтрації у фінальній стадії закінчується з зафіксованою похибкою у 5 м. За попередніми оцінками, ця похибка може спричиняти зсув точки дотику до ЗПС відносно розрахункового положення приблизно на 250–300 м, що може породжувати нештатну ситуацію, пов'язану з виїздом ПС за межі ЗПС. Результати моделювання для синтезованого МФК показують, що оцінка висоти прямує до її фактичного значення лише у асимптотичному розумінні. Це означає, що різницева сигнал каналу висоти буде розв'язаним від неконтрольованих збурень не повною мірою, тобто має місце тільки часткова декомпозиція на інтервалі часу  $150 < k < 300$ . Надалі для ситуація покращується, оскільки по мірі збіжності процесу оцінювання похибки прямують до нуля у середньоквадратичному сенсі, а різницева сигнал здійснює коливання навколо нульового значення. Щодо профілю польоту ПС у вертикальній площині, то зміна висоти при вирівнюванні за умови дії збурень має вигляд, показаний на рис. 18б, з якого неважно помітити, що МФК у цілому адекватно віддзеркалює фактичну зміну

висоти, за винятком перехідного процесу на ділянці 200–400 м, де має місце систематична похибка приблизно у 1–1,5 м. По мірі збіжності процесу оцінювання екіпаж ПС отримує об’єктивну оцінку фактичної висоти і здатен виконати маневр щодо зменшення сили тяги двигунів з метою дотримання регламентованої траєкторії зниження. Порівнюючи рис. 18 а,б,в можна бачити, що МФФ вирішує проблему декомпозиції оптимально у межах уведених обмежень і у повному обсязі, але проте потребує високоякісної моделі системи та додаткової апріорної інформації щодо супутніх збурень та несправностей. У разі її відсутності можна скористатись робастним варіантом розщеплення РФК.

7. Заключна частина розділу стосується результатів моделювання більш складної та практично значимої задачі функціональної діагностики – роздільному оцінюванню як несправностей, так і вектора стану системи за умови сукупної дії несправностей і збурень у каналі спостережень та у підсистемі «об’єкт–регулятор», з використанням розширених математичних моделей. У межах цих моделей досліджувалась точність оцінок параметрів траєкторії ПС на етапі вирівнювання: висоти ПС, кута тангажу та швидкості їх зміни для двох різновидів робастних структур, побудованих на основі МФФ та МФК. Варіант з МФФ використовує стандартний канал спостережень  $y(k) = \mathbf{H}(k)s(k) + v(k)$  та розширену модель динаміки

$$s(k+1) = \Sigma(k+1,k)s(k) + \Gamma(k+1,k)u(k) + \Psi(k+1,k)f(k) + \Omega(k+1,k)d(k) + w_s(k). \quad (9)$$

Суть синтезу полягала у розщепленні РФК на три допоміжні структури–фільтри меншої розмірності, які у сукупності були б здатні задовільно апроксимувати, у певному розумінні, РФК. Результати моделювання показали, що усі вищезгадані оцінки, у межах прийнятної точності (табл.11), збігаються з фактичними значеннями оцінюваних параметрів. Варіант побудови *робастного* фільтра, функціональне ядро якого складає МФК, передбачав застосування обох моделей розширеного типу  $y(k) = \mathbf{H}(k)s(k) + \mathbf{F}(k)f(k) + v(k)$ ;

$$s(k+1) = \Sigma(k+1,k)s(k) + \Gamma(k+1,k)u(k) + \Psi(k+1,k)f(k) + \Omega(k+1,k)d(k) + w_s(k). \quad (10)$$

Тут можна помітити, що несправності одночасно впливають, як на стан системи, так і на вихідні змінні, а збурення – лише на змінні стану. Новими елементами є наявність несправностей у каналі спостережень та обмаль апріорної інформації щодо їх структури. З результатів моделювання випливає, що усі зміни висоти обумовлені дестабілізуючими факторами у підсистемі «об’єкт–регулятор» відстежуються оперативнo та з прийнятною точністю (див. табл. 9) за рахунок введення механізму компенсації, заснованому на додатковій інформації з каналу спостережень.

Таблиця 9

Точність оцінювання параметрів траєкторії робастними фільтрами (усталений режим)

Оцінюваний параметр		$s_1^* (\%/k)$	$s_2^* (\%/k)$	$s_3^* (\%/k)$	$s_4^* (\%/k)$	$f^* (\%/k)$	$d^* (\%/k)$
Середній квадрат похибки	МФФ	0,215	0,011	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$0,93 \cdot 10^{-3}$	5,74	1,36
	МФК	0,256	0,024	$7,68 \cdot 10^{-3}$	$3,87 \cdot 10^{-3}$	1,39	–

Оцінки параметрів  $s_1^*(k/k) - s_4^*(k/k)$ , заснованих на методі найменших квадратів, поступаються у точності оцінкам МФФ, оскільки у першому випадку мінімізується лише слід коваріаційної матриці похибок фільтрації  $P_s(k/k)$ . Щодо точності оцінювання несправностей, то за результатами порівняння перевагу слід віддавати саме оцінці найменших квадратів, оскільки вона опирається на додаткову інформацію згідно розширеної моделі каналу спостережень.

8. Комплексні стендові (див. рис.14) напівнатурні випробовування виконувались з метою: встановлення факту, що саме фазовий канал синхронізації є найбільш ймовірним джерелом порушень працездатності кутомірного каналу; збору статистичних даних щодо ймовірностей втрати працездатності кутомірною підсистемою унаслідок пропусків або хибного декодування основного опорного сигналу посадкової системи у вигляді 5-и розрядного коду Баркера або неправильної ідентифікації кутової функції.

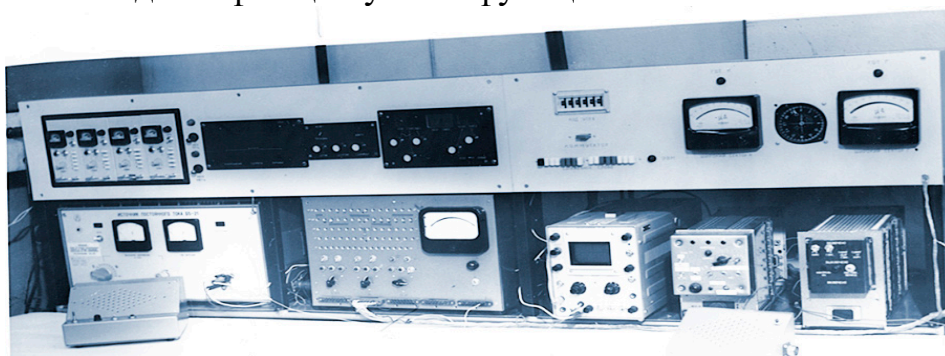


Рис. 14. Стенд навінатурних випробовувань бортового кутового вимірювача MLR75

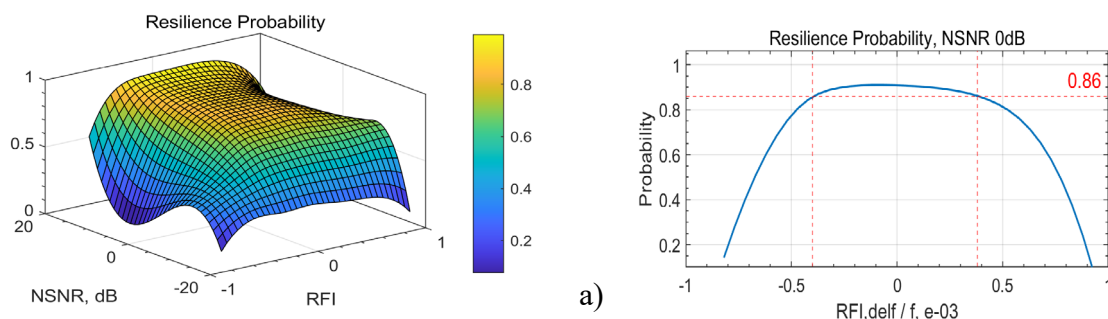


Рис. 15. Ймовірність безвідмовної роботи кутомірного каналу (ефективність каналу синхронізації) в залежності від: а) – рівня нестабільності проміжної частоти

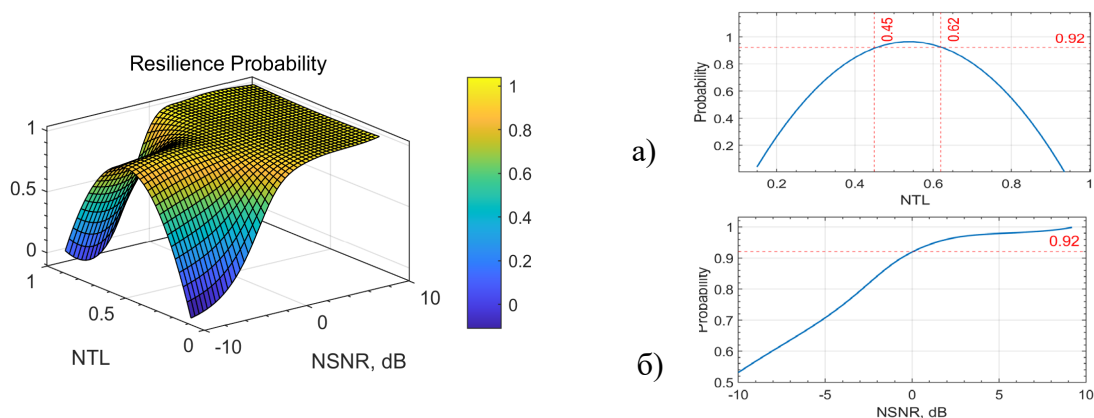


Рис. 16. Ймовірність безвідмовної роботи кутомірного каналу (ефективність декодування опорного сигналу) в залежності від: а) – порогового рівня визначеності; б) – нормованого відношення сигнал/шум

За результатами стендових випробовувань (рис. 15–16) підтверджені висунуті припущення пов'язані з надійністю функціонування кутомірного каналу, виявлені потенційні проблеми, що вимагають додаткового аналізу та коректування: на стабільність роботи кутомірного каналу найбільший вплив здійснює фазовий канал синхронізації, за умов відносної нестабільності проміжної частоти на рівні  $\pm 0.4 \cdot 10^{-3}$  та нормалізованому відношенню сигнал/шум (NSNR) на рівні 0дБ ймовірність безвідмовної роботи знаходиться на рівні 0.86; ефективність декодування опорного сигналу залежить від енергетичного співвідношень сигнал/шум у просторі траєкторної кривої, відносної нестабільності частоти та порогових рівнів визначеності схеми прийняття рішень, так за умов відносної частотної нестабільності та NSNR наведених вище та величин нормованих адаптивних порогів 0.45 – 0.62 ймовірність безвідмовної роботи складає 0.92. Отримані результати стали основою для формування необхідної апріорної інформації з метою корекції наслідків виявлених потенційних проблем шляхом застосування алгоритмів фільтрації з підвищеною стійкістю до дії несправностей у вигляді аномальних похибок каналу спостережень.

### ВИСНОВКИ

У представленій дисертаційній роботі розв'язана науково–технічна проблема, суть якої полягає у розробці та реалізації на системній основі нових, вдосконаленні відомих методів, пристроїв та модельно-орієнтованих алгоритмів формування носіїв діагностичних ознак, які у поєднанні з використанням сучасних ІТ–технологій здатні забезпечити регламентовані показники безпеки польотів у режимі посадки ПС, що значною мірою визначаються точністю, надійністю та ефективністю радіонавігаційного обладнання посадкових систем за умови дії широкого спектру несправностей. Отримані результати дають підстави сформулювати відповідні висновки та рекомендації, що мають теоретичне й практичне значення:

1. 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 ФК, що опираються на математичні моделі кількісного типу, при цьому інші відомі модельно-орієнтовані методи є окремими випадками цієї концепції.

2. У межах запропонованої концепції обґрунтовано науковий підхід, згідно якого доцільно зосередитись не стільки на добре досліджених функціональних відновниках О'Рейлі–Луенбергера та ФК, скільки на їх реконструкції, використовуючи останні у якості основного інструментарію для дослідження таких специфічних задач, як виявлення, локалізація та ідентифікація несправностей у лінійних системах реального часу. Це дозволяє з єдиних позицій розглядати як детермінований, так і стохастичний варіант постановки задач функціональної діагностики у системах неперервного та дискретного часу, відрізнитись високою оперативністю без установки додаткового обладнання та бути вільним від занадто обтяжливих обмежень практичного характеру.



3. Розроблені математичні моделі динаміки ПС, як об'єкта керування для найбільш відповідальних етапів посадкового маневру «плануванні та вирівнюванні». Запропонована строго аргументована математична модель сенсорної підсистеми, яка отримана шляхом реконструкції номінальної моделі каналу спостережень і здатна зберігати працездатність у широкому діапазоні співвідношень сигнал/шум у стандартному ФК та не виключає появу спостережень різної точності включно з аномальними. На основі розроблених моделей створені пакети робочих програм, що дозволило виконати порівняльний аналіз синтезованих пристроїв оцінювання за критерієм «точність-достовірність-обчислювальна ефективність» та ранжувати їх за вибраними ознаками.

4. Подальшого розвитку набули теоретичні засади синтезу пристроїв відновлення вектору стану лінійної системи стійких до дії несправностей у каналі спостережень. У межах байєсового підходу з використанням запропонованих моделей синтезовано оптимальний пристрій відновлення повного порядку у вигляді банку модельно-умовних ФК, кожен з яких налаштований на відповідну реалізацію  $N$  – мірної параметричної послідовності, де  $N$  – число конкуруючих гіпотез. Встановлено, що для практичних цілей достатньо обмежитись 3–5 базовими гіпотезами. Коли інтерес концентрується навколо впливу аномальних похибок на точність процесу відновлення вектора стану достатньо обмежитись двома гіпотезами (справний канал спостережень, наявності аномальних похибок). Показано, що на ділянці планування синтезований пристрій забезпечує найкращі показники захисту від впливу аномалій у каналі спостережень, а вигреш у точності оцінювання висоти порівняно з ФК складає близько двох порядків у перехідному режимі і до 10–25 разів в усталеному. З метою подолання апріорної невизначеності щодо ймовірностей появи аномальних похибок запропонований адаптивний варіант побудови пристрою оцінювання.

5. Розроблені методи синтезу фільтрів робастного типу, ступінь захищеності яких від дії аномальних похибок залежить від кількості та якості доступної апріорної інформації, а реалізація відбувається шляхом структурних або(та) алгоритмічних спрощень. Запропоновано методи синтезу: робастного фільтра структурно-укороченого типу, алгоритмічно спрощеного швидкодіючого фільтра з селекторною схемою, робастного пристрою оцінювання лінійного типу.

6. 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 несправностей та їх інтенсивність. До складу синтезованої структури входять система первинної обробки, що містить ФК налаштований на режим роботи без несправностей та система вторинної обробки зі схемою виявлення несправностей на основі статистичного тесту, який використовує оцінки невідомих параметрів за критерієм максимуму узагальненого відношення правдоподібності. Показано, що з метою усунення «вторинних» наведених несправностей схема компенсації повинна повертатись у початковий стан після кожного спрацювання схеми виявлення.

7. Подальшого розвитку набув 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 різницевого сигналу. У підсумку це призводить до зменшення розмірності розв'язуваної задачі та економії обчислювальних ресурсів.

8. Виявлена та з'ясована сутність протиріччя декомпозиційної схеми за Фрідландом. Встановлено, що локальна оптимальність розщепленої структури гарантується лише за умови відсутності стохастичної складової у моделі динаміки несправності. Вперше запропонована науково обґрунтована методологія синтезу локально-оптимального розщепленого фільтра Фрідланда, виходячи якого еквівалентні виходам РФК за умови дотримання певних обмежень. Методологія ґрунтується на приведенні коваріаційних матриць похибок фільтрації та екстраполяції РФК до діагонального виду шляхом застосування матричних ортогональних перетворень спеціального типу. У межах розробленої методології, дістав обґрунтування метод синтезу локально – оптимального трьох каскадного фільтра розщепленого типу, який на відміну від відомих, дозволяє враховувати появу несправностей та збурень, як у підсистемі «об'єкт-регулятор», так і у підсистемі спостережень, що забезпечує можливість одночасно і роздільно оцінювати вектор стану системи та вектори присутніх у системі несправностей й збурень. У межах доопрацьованих моделей та розроблених методів на етапі «вирішування» ПС синтезовано МФК з невизначеними входами та МФФ за топологією Фрідланда.

9. Вперше запропоновано метод синтезу системи розщеплених фільтрів робастного типу, який базується на припущенні повної відсутності ймовірного опису системних несправностей та збурень і представленні їх довільними функціями часу, що дозволило подолати такі перепони на шляху практичної реалізації розробленого алгоритму, як надмірна складність та великий об'єм необхідної апріорної інформації.

10. Розроблено 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.

11. Для випадку, коли ЗПС допускає двосторонню посадку ПС, у межах регламентованих норм, запропоновано спосіб розгортання кутового обладнання на місцевості, що не погіршуючи тактико-технічні характеристики посадкової системи сприяє майже двократному розвантаженню диспетчерської служби аеропорту від надлишкової інформації. Це дозволяє уникати грубих помилок за рахунок людського фактору. Новизна запропонованого способу захищена патентом України.

12. Поєднання результатів стендових напівнатурних випробовувань з результатами статистичного моделювання та використанням номограм вигравшів 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 вимог для кожного, окремо взятого випадку.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**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).

2. Volovyk A., Kychak V. Detection Filter Method in Diagnostic Problems for Linear Dynamic Systems. *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*. 2021. Iss. 84. P. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.84>. (Web of Science).

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. (SJR Q2, Web of Science).

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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_37). (Scopus).

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)

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)

### **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.

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.

9. Воловик Ю. М., Воловик А. Ю., Шутило М. А., Загорський В. В. Квазі-оптимальна фільтрація різноточних кутових вимірювань в системі посадки сантиметрового діапазону. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2012. № 3. Т.1. С. 110-117.

10. Воловик А. Ю., Кичак В. М. Основи теорії функціональних відновлювачів діагностичного типу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 3. С. 109-118.

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.

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.

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.

14. Воловик А. Ю., Гаврілов Д. В. Апроксимація розширеного фільтра Калмана паралельною двокаскадною структурою. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. № 4. С. 107-115.

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.

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/ictee2022.02.067>.

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>

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>

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/ictee2023.09.067>.

#### **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.

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.

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.

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.

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.

#### **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.

26. Navrilov D., Volovyk A., Koval L., Yarovy 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*

#### **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.

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.

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.*

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.

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.

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.

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.

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.

35. Воловик А.Ю., Осадчук О.В., Шутило М.А., Червак О.П. Идентификация зарождающихся неисправностей методом раздельного оценивания. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали XVIII міжнародної конференції. 8–13 червня 2018 р., Одеса. С. 92-94.

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.

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)

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)

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.

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.

41. Воловик А. Ю. Базовые определения модельно ориентированных диагностических систем. *Science, society, education: topical issues and development prospects* : 10–12 May 2020, Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 228-233.

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)

43. Воловик А.Ю. Устойчивость формирователей разностного сигнала модельно-ориентированных систем диагностики. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах* : Матеріали XXI міжнародної конференції. 3–7 червня 2021 р., Одеса, 2021. С. 17-19.

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)

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).

46. Воловик А. Ю. Актуальность применения информационно – измерительных систем функционально устойчивого управления. *Priority directions of science development* : Abstracts of the 5th International scientific and practical conference, 2–3 March 2020, Lviv, Ukraine, 2020. P. 168-173.

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.

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)

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 26.09.2022)

50. Havrilov D., Volovyk A., Semenov A., Koval L., Vasylykivskyi 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).

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).

52. Volovik A., Havrilov D., Koval L., Vasykivskiy M., Yarovy 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).

### АНОТАЦІЯ

**Воловик А. Ю. Модельно-орієнтовані методи обробки сигналів в радіотехнічних системах з підвищеною функціональною надійністю. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Вінницький національний технічний університет, Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Вінниця, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розв'язку актуальної науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає у розробці на системній основі нових та вдосконаленні відомих методів, пристроїв та алгоритмів формування сигналів–носіїв діагностичних ознак, які у поєднанні з використанням сучасних ІТ– технологій здатні забезпечити регламентовані показники точності, функціональної надійності та ефективності радіонавігаційного обладнання посадкових систем за умови дії широкого спектру несправностей.

Проблема проектування пристроїв відновлення повноформатного вектора стану посадкової системи сантиметрового діапазону за результатами неповних спостережень в присутності порушень працездатності окремих функціональних підсистем вирішувалась з залученням базових принципів та методів системного аналізу і синтезу. Запропонована науково обґрунтована концепція, згідно якої переважна більшість прикладних задач синтезу пристроїв та алгоритмів формування сигналів–носіїв діагностичних ознак може бути розв'язаною за допомогою спеціальних методів обробки сигналів, орієнтованих на кількісні математичні моделі досліджуваних систем. Надане обґрунтування наукового підходу, згідно якого основна увага в дослідженні зосереджена не стільки на добре досліджених пристроях відновлення Калмана та О'Рейлі–Луенбергера, скільки на їх реконструкції у відповідності до вельми специфічних задач функціональної діагностики динамічних систем реального часу.

Розвитку дістали теоретичні основи модельно-орієнтованих діагностичних відновників, порядок яких співпадає з порядком контрольованої системи. Запропонована модифікована структура пристрою відновлення повного порядку з невизначеними входами. Встановлені та доказані умови існування таких відновлювальних пристроїв. 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 у спрощений спосіб контролювати збіжність процесу фільтрації та його оптимальність.

Запропонована математична модель сенсорної підсистеми, яка отримана шляхом реконструкції номінальної моделі каналу спостережень і здатна збері-



гати працездатність у широкому діапазоні співвідношень сигнал/шум у стандартному фільтрі Калмана. Подальшого розвитку набули теоретичні основи синтезу пристроїв відновлення вектору стану лінійної динамічної системи, стійких щодо дії несправностей у каналі спостережень на основі байєсового підходу.

Подальшого розвитку набули метод сукупного виявлення та ідентифікації раптових змін у окремих складових вектора стану лінійної дискретної системи де невідомими величинами є час появи несправностей та їх інтенсивність та метод виявлення множинних несправностей у підсистемах об'єкта контролю та їх роздільного оцінювання у межах геометричного підходу.

Запропонована методологія синтезу локально–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, введенням додаткового корегувального входу, що скеровується окремим фільтром орієнтованим на оцінку несправностей. У межах розробленої методології, дістали обґрунтування методи синтезу локально – оптимального трьох каскадного фільтра розщепленого типу та метод синтезу системи розщеплених фільтрів робастного типу, який базується на припущенні повної відсутності ймовірнісного опису системних несправностей та збурень і представленні їх довільними функціями часу.

Основні результати дисертаційної роботи, що присвячені практичним аспектам теорії функціональних відновників діагностичного типу, представлені прикладом авіаційної системи посадки сантиметрового діапазону. Розроблена номінальна математична модель динаміки зміни кута місця повітряного судна у процесі виконання посадкового маневру. В рамках байєсової концепції виконано порівняльне дослідження якісних показників оптимальних, квазіоптимальних та адаптивних фільтрів з різним ступенем захисту від аномальних похибок у кутомірному каналі в залежності від доступної апріорної інформації. Досліджені характеристики точності оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна на етапі вирівнювання для двох різновидів робастних структур, побудованих на основі модифікованих фільтрів Фрідланда та Кітанідіса.

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

**Ключові слова:** модельно-орієнтовані методи, лінійна система, оптимальне оцінювання, роздільне оцінювання, аномальні похибки, збурення з невизначеною структурою, псевдобайєсові оцінки, декомпозиція розширеного фільтра Калмана, відновлювач О'Рейлі –Луенбергера, стандартний фільтр Калмана, фільтр Калмана з невизначеними входами, модифіковані фільтри Кітанідіса та Фрідланда.

**ABSTRACT**

**Volovyk A. Yu Model-oriented signal processing methods in radio engineering systems with increased functional reliability.– Manuscript.**

Thesis for a scientific degree of Doctor of Engineering in the specialty 05.12.13 «Radio Engineering Devices and Telecommunication Means» (172 – Telecommunications and radio engineering). – Vinnytsia National Technical University, Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2024.

The thesis is devoted to solving the actual applied-science problem of system basis developing new and improve known methods, devices and algorithms for generating diagnostic features signals-carriers, that in combination of the modern IT technologies using are able to provide accuracy regulated indicators, functional reliability and efficiency radio navigation landing systems equipment subject to a wide range of malfunctions. The basic principles of system analysis and synthesis were used as a basis for the design of full-format recovery devices for the landing system state vector based on the incomplete observations results in the presence of individual functional subsystems faults. In particular, in the first chapter for the results of the literature primary sources analysis and our own research proposed a scientifically sound concept, according to the vast majority of applied problems of devices synthesis and algorithms for the formation of diagnostic features signals-carriers can be solved by special signal processing methods, focused on the application of quantitative mathematical models. Moreover, the main attention should be focused not so much on the well-studied Kalman and O'Reilly-Luenberger observer devices as on their modification and (or) reconstruction in accordance to the specific tasks of real-time dynamic system functional diagnostics. In the second chapter, the focus was on methods for synthesizing full-order diagnostic observers. The fundamentals of the theory of O' Reilly-Luenberger observers are briefly outlined. These materials were used as a theoretical basis for further research. Sections three through five are devoted to the issues of filter synthesis under conditions of a priori uncertainty regarding operating faults and associated disturbances that have no exhaustive statistical description or its complete absence. In the sixth chapter, using the results of computational experiment by Monte Carlo method and semi-natural bench tests, studies were carried out to confirm the main theoretical provisions of sections 3-5 with practical results on the example of a centimeter range instrumental landing system, known in ICAO as MLS (Microwave Landing System). The main results and recommendations, that follow from the performed research, are stated in the conclusion. Quantitatively presented and characterized the estimating methods effectiveness of the landing system current state, that have different accuracy and robustness to disturbances of angular radio-electronic equipment depending on the quantity and quality of available a priori data.

**Keywords:** model-based fault detection methods, discrete linear dynamic system, the state vector optimal estimates, separate estimation, an indeterminate structure perturbation, variable parameters stochastic systems, pseudo-Bayesian estimates, extended Kalman filter decomposition, Luenberger-O'Reilly observer, unknown inputs Kalman's filter.