

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ШЕФЕР ОЛЕКСАНДР ВІТАЛІЙОВИЧ



УДК 621.396.669

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ БОРТОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Козелков Сергій Вікторович,
Державний університет телекомунікацій, директор
Навчально-наукового інституту телекомунікацій та
інформатизації.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Жураковський Богдан Юрійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря
Сікорського, професор кафедри технічної
кібернетики;

доктор технічних наук, професор
Краснобаєв Віктор Анатолійович,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна, професор кафедри електроніки та
управляючих систем;

доктор технічних наук, доцент
Фриз Сергій Петрович,
Житомирський військовий інститут імені
С. П. Корольова, начальник кафедри
телекомунікацій та радіотехніки.

Захист відбудеться «14» вересня 2018 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.01 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий

«03» липня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



К. А. Трубочанінова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для забезпечення незалежності й суверенітету, Україна повинна підвищувати рівень економічного потенціалу й народного добробуту держави.

Прогрес у вирішенні комплексу державних завдань із побудови перспективних телекомунікаційних систем тісно пов'язаний із прийняттям "Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року", котра нерозривна зі Стратегією національної безпеки України, а також тенденціями розвитку української космічної програми та удосконаленням науково-технічного і виробничого потенціалу галузі розвитку телекомунікаційної інфраструктури, згідно зі Стратегією сталого розвитку "Україна-2020".

Питання побудови перспективних телекомунікаційних систем та шляхи удосконалення існуючих свідчать, що найбільш ефективним є покращення якості функціонування бортових радіолокаційних систем (БРЛС).

Особливо значне зниження показників якості БРЛС простежується в умовах впливу організованих і несанкціонованих завад на вхід їх радіоприймальних пристроїв (РПП), що характеризує найбільш імовірні, реальні умови функціонування.

Відомий досвід експлуатації БРЛС показав, що вони мають низькі показники якості функціонування в умовах радіоелектронної протидії (РЕП), тому, з урахуванням перспектив удосконалення засобів РЕП, на передній план висувається проблема підвищення реальних показників якості БРЛС в очікуваних умовах їх використання.

Це можливо здійснити на основі більш повної реалізації потенційних можливостей телекомунікаційних систем.

Можливості практичної реалізації потенційних характеристик БРЛС суттєво обмежені низкою внутрішніх (відносно низька апаратурна надійність та нестабільність параметрів телекомунікаційних систем, обмеженість динамічного діапазону приймальних пристроїв БРЛС) і зовнішніх чинників (нестационарність у часі умов поширення радіохвиль, відхилення носія БРЛС від рівномірного прямолінійного руху, потрапляння завад на вхід РПП БРЛС).

Цим насамперед і пояснюється наявне на даний час помітне відставання реальних показників якості БРЛС від їх потенційних можливостей.

Найвагомішим фактором, котрий істотно впливає на якість функціонування БРЛС та їх завадостійкість в умовах РЕП є обмеженість динамічного діапазону реальних РПП внаслідок нелінійності їх амплітудних характеристик (АХ). Ефект обмеженості динамічного діапазону РПП перевищує дію інших факторів у ряді випадків. Особливо це простежується під час впливу завад різного роду на РПП.

Практична реалізація потенційних можливостей БРЛС, котрі на даний час суттєво вищі від реально досяжних їх тактико-технічних характеристик (ТТХ), є однією із головних задач сучасної теорії і практики телекомунікаційних систем.

На сьогодні можна підвищити якість функціонування БРЛС насамперед застосуванням сучасних радіотехнічних методів, які набули значного розвитку завдяки ґрунтовним дослідженням учених, центральне місце серед яких належить науковим роботам, проведеним М. М. Бугом, С. Грехемом, Дж. Гудменом, М. А. Івановим, С. В. Козелковим, А. В. Корольовим, В. А. Краснобаєвим, С. Маасом, А. І. Погореловим, С. І. Приходьком, Г. В. Стоговим, В. І. Тіхоновим, С. Е. Фальковичем, А. І. Фальком, Л. М. Фінком, Я. Д. Ширманом та ін.

Необхідно звернути увагу на те, що нелінійні процеси в реальних РПП є мало вивченими й одними з тих, котрі найбільш важко усуваються. Крім того, вони суттєво та багатогранно впливають на якість функціонування телекомунікаційних систем й у загальному випадку недостатньо піддаються суворому й точному опису та обліку.

У зв'язку з цим однією з найбільш важливих й актуальних задач, спрямованих на підвищення показників якості БРЛС, є розширення динамічного діапазону їх РПП.

Слід також відмітити, що підвищення ступеня лінійності АХ радіоелектронних приладів має дуже важливе значення для удосконалення систем автоматичного керування (САК). Зокрема нелінійність АХ реальних радіоелектронних приладів – основна перепона на шляху практичного створення інваріантних САК до обстановки за наявності завад.

Однак, відомі способи розширення лінійного динамічного діапазону РПП, до яких належать передусім схеми автоматичного регулювання підсилення (АРП), системи адаптивного регулювання чутливості (АРЧ), а також функціональні підсилювачі (ФП) із нелінійною АХ, не повною мірою придатні для підвищення показників якості БРЛС в умовах РЕП.

Дані способи засновані на нелінійному узгодженні динамічного діапазону вхідних впливів із відносно вузьким динамічним діапазоном вихідних сигналів, тому їх застосування супроводжується незворотними втратами частини інформації, зниженням дальності дії БРЛС і значними амплітудними та фазовими нелінійними спотвореннями.

Це призводить до суттєвого зниження показників якості телекомунікаційних систем (у ряді випадків їх точність на порядок нижча від точності БРЛС із лінійним РПП через нелінійність АХ), а також до значного погіршення їх завадостійкості.

З іншого боку, для розширення динамічного діапазону РПП БРЛС способи, засновані на застосуванні схем із від'ємним лінійним зворотним зв'язком (ЗЗ), є малоприматними. Це обумовлено зменшенням коефіцієнта передачі РПП і, отже, зниженням його чутливості, що призводить до зниження дальності дії БРЛС і втрати інформації про слабкі радіолокаційні цілі.

Груповий характер радіолокаційних сигналів суттєво обмежує можливості застосування методу, заснованого на багаторазовому послідовному в часі використанні лінійної ділянки АХ радіоелектронних приладів.

Разом із тим оптимальні в принциповому відношенні відомі лінійні способи розширення динамічного діапазону РПП, засновані на застосуванні

схем компенсацій, корекції нелінійних спотворень, а також схем із нелінійним від'ємним ЗЗ, належать до жорстких (тобто постійно включених) заходів захисту, оскільки використовуються детерміновані фільтри з апріорно визначеними й постійними в часі параметрами.

У зв'язку з цим дані способи дуже чутливі до неминучих помилок налагодження, апаратурної реалізації та тимчасової нестаціонарності параметрів реальних радіопристроїв. Як наслідок, відомі лінійні способи мають недостатню точність пригнічення нелінійних спотворень і задовільно функціонують тільки у відносно вузькому динамічному діапазоні вхідних впливів, поза яким вони неефективні й можуть вносити додаткові спотворення.

Тому досить актуальним на даний час є розроблення адаптивних способів розширення лінійного динамічного діапазону РПП БРЛС, котрі були б вільні від зазначених вище недоліків відомих детермінованих лінійних способів. При цьому, з практичної точки зору, найбільш доцільним і перспективним є синтез адаптивних схем компенсації нелінійних спотворень.

Це обумовлено тим, що дані схеми є найбільш простими, мають найвищі потенційні характеристики точності та не знижують надійність БРЛС, оскільки вихід із ладу компенсуючого фільтра не призводить до відмови РПП, на відміну від відомих адаптивних компенсаторів завад у лінійних РПП, котрі в цьому контексті тільки умовно названі лійними.

Очевидно, що можливості підвищення показників якості БРЛС на основі синтезу нелінійних адаптивних компенсаторів можуть бути успішно практично реалізовані лише на основі адекватного уявлення й точного аналізу нелінійних процесів у РПП з урахуванням частотно-залежного характеру його нелінійних АХ. Крім того, для визначення науково-обґрунтованих вимог до ширини лінійного динамічного діапазону як РПП в цілому, так і окремих його каскадів, для заданих умов застосування БРЛС необхідно провести конструктивне дослідження впливу нелінійності АХ реальних багатокаскадних РПП на показники якості БРЛС. При цьому вірогідність знаходження оптимальних варіантів побудови нелінійних адаптивних компенсаторів і способів їх підключення до РПП значною мірою визначається можливістю наочного представлення досліджуваних РП на різних рівнях їх деталізації і зручністю методики аналізу для аналітичних досліджень і чисельних розрахунків із застосування ЕОМ.

На сьогодні вплив нелінійності АХ РПП на якість функціонування БРЛС вивчений недостатньо. Зокрема, відсутня реальна можливість інтегрально оцінити вплив нелінійних процесів у РПП безпосередньо на показники якості БРЛС, котрі справедливі лише для відносно вузького класу порівняно простих однокаскадних безінерційних РПП. З іншого боку, у процесі аналізу завадостійкості БРЛС виходять, як правило, з припущень про лінійність РПП. Однак нелінійний вплив завад унаслідок неминучої нелінійності АХ реальних РПП значною мірою знижує показники якості телекомунікаційних систем (ТС). Урахування нелінійної інтерференції завад і боротьба з нею дуже ускладнені, порівняно з методами дослідження й підвищення завадостійкості лінійних РПП БРЛС.

Отримані на даний час результати аналізу впливу завад на БРЛС із нелінійними РПП мають, як правило, досить обмежену область застосування і носять в основному якісний характер.

Дотепер дослідження проводилися зазвичай із умов введення досить серйозних припущень щодо спрощення і недостатньою мірою враховували специфічні особливості проходження суміші радіолокаційних сигналів і завад у складних багатокаскадних РПП. Порівняння результатів із даними аналізу в лінійному наближенні, які були отримані різними методами, у ряді випадків досить ускладнене. Деякі результати недостатньо добре поєднуються із критеріями оцінки нелінійних властивостей РПП, котрі використовуються на практиці.

Отже, **актуальною науково-технічною проблемою** є теоретичне обґрунтування та розроблення методології підвищення якості функціонування бортових радіолокаційних систем на основі удосконалення адаптивних методів компенсації нелінійних спотворень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційні дослідження проводилися в рамках «Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року» (постанова Кабінету Міністрів України від 30 березня 2011 р. № 238-р) та «Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013-2017 роки» (постанова Кабінету Міністрів України від 15 лютого 2012 р., № 79) та Національного космічного агентства України шифри: «Впровадження - КС», «Обґрунтування - КС», «Спостереження - НУ», «Інтеграція», «Перспектива – КА»; Міністерства оборони України шифри: «КНК - 58250», «Платан», «Тясмин», «Цямрина - 10», «Метр» відповідно до напрямів наукової діяльності Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління (м. Київ) та Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення якості функціонування бортових радіолокаційних систем.

Для досягнення поставленої мети та вирішення зазначеної науково-технічної проблеми у дисертаційній роботі сформульовані і вирішені наступні *наукові завдання*:

1. Провести дослідження існуючих та перспективних методів підвищення якості функціонування бортових радіолокаційних систем.

2. Розробити аналітичний метод визначення науково обґрунтованих вимог до частотно-залежних параметрів як у цілому, так і окремих каскадів радіоприймальних пристроїв.

3. Забезпечити подальший розвиток теоретичних основ функціонального методу у напрямку розробки методів визначення ядер Вольтерра багатомірних радіопристроїв високого порядку й обернених нелінійних аналітичних операторів.

4. Провести дослідження функціональної залежності показників якості

бортових радіолокаційних систем від ширини лінійного динамічного діапазону.

5. Розробити метод підвищення завадостійкості функціонування бортових радіолокаційних систем шляхом впливу на іоносферне середовище розповсюдження радіохвиль.

6. Удосконалити модель урахування впливу частотно-селективних властивостей трансіоносферного розповсюдження радіохвиль на завадостійкість радіоприймальних пристроїв.

7. Розробити адаптивний метод компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях для розширення їх лінійного динамічного діапазону.

8. Провести оцінку ефективності застосування розроблених практичних рекомендацій для підвищення показників якості сучасних і перспективних бортових радіолокаційних систем у найбільш імовірних умовах їх застосування.

Об'єктом дослідження є процес адаптивної компенсації нелінійних спотворень радіосигналу.

Предмет дослідження – радіоприймальні пристрої бортових радіолокаційних систем.

Методи дослідження. Теоретичною базою для вирішення сформульованої науково-технічної проблеми є теорія завадостійкості та статистичної радіотехніки, математичного аналізу й синтезу. У процесі досліджень використані класичні та сучасні методи теорії сигналів і систем, теорії оптимального оцінювання параметрів та станів і теорії виявлення сигналів для визначення вимог до частотно-залежних параметрів системи та функціональної залежності показників якості. Під час вирішення завдань використовувався апарат теорії ймовірностей, функціональний метод рядів Вольтерра для дослідження нелінійних процесів. Методи теорії завадостійкості використані для підвищення надійності зв'язку.

Розроблений метод компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях ґрунтується на методах виявлення й адаптивного оброблення сигналів для розширення лінійного динамічного діапазону. Основні практичні результати отримано з використанням сучасних методів імітаційного моделювання, обчислювальної математики та прийняття рішень. Одночасно з аналітичними розрахунками отримані експериментальні результати оцінювалися за допомогою методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано аналітичний метод визначення науково обґрунтованих вимог до частотно-залежних параметрів як у цілому, так і окремих каскадів радіоприймальних пристроїв, котрий відрізняється від відомих методів тим, що базується на урахуванні статистичних і спектральних характеристик радіолокаційних сигналів і завад, що дозволяє визначити мажоритарні вимоги до динамічного діапазону каскадів.

2. Отримав подальший розвиток метод аналізу впливу нелінійних процесів у багатокаскадних радіоприймальних пристроях за рахунок адекватного опису радіопристроїв високого порядку з максимально повним урахуванням їх

нелінійних і динамічних властивостей, що дозволило провести оцінку показників якості бортових радіолокаційних систем в умовах радіоелектронної протидії.

3. Вперше розроблено метод функціональної залежності показників якості бортових радіолокаційних систем від ширини лінійного динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв, який, на відміну від існуючих, враховує найбільш імовірні умови їх практичного застосування та дозволяє побудувати адекватну модель нелінійних процесів.

4. Вперше одержано метод локального зниження щільності іоносферної плазми для підтримання надійності зв'язку та підвищення завадостійкості функціонування радіоприймальних пристроїв бортових радіолокаційних систем, котрий відрізняється від відомих методів високою енергоефективністю.

5. Удосконалено модель урахування впливу частотно-селективних властивостей трансіоносферного розповсюдження радіохвиль на завадостійкість радіоприймальних пристроїв, котра відрізняється від існуючих тим, що дає можливість урахувати взаємозв'язок статистичних параметрів передавальних характеристик каналу зв'язку з фізичними параметрами іоносфери та частотними параметрами радіосигналів бортових радіолокаційних систем.

6. Розроблено адаптивний метод компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях на основі застосування синтезованих нелінійних адаптивних компенсаторів для розширення лінійного динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв, котрий відрізняється від відомих тим, що не призводить до зниження надійності бортових радіолокаційних систем як в апаратурному, так і в функціональному сенсі, що дозволило підвищити якість функціонування бортових радіолокаційних систем.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Використання удосконаленого адаптивного методу компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях дозволяє підвищити якість функціонування бортових радіолокаційних систем в умовах радіоелектронної протидії у (1,82-2,03) рази, порівняно з існуючими методами, що забезпечує достовірність та якість прийому й оброблення радіосигналів у реальних умовах.

2. Розроблені рекурентні алгоритми та методика знаходження ядер Вольтерра багатомірних радіотехнічних систем високого порядку й обернених нелінійних аналітичних операторів дозволяють покращити точність оцінювання реальних показників якості бортових радіолокаційних систем на (5-7)% у заданих умовах їх функціонування.

3. Розроблений науково-методичний апарат враховує вплив властивостей трансіоносферного тракту й забезпечує компенсацію негативних чинників (поглинання, відбиття та розсіювання радіосигналу) та дозволяє підвищити завадостійкість функціонування радіообладнання носія бортової радіолокаційної системи в середньому на 23%.

4. Розроблений метод системного аналізу впливу нелінійних процесів у багатокаскадних радіоприймальних пристроях бортових радіолокаційних

систем в умовах радіоелектронної протидії дозволяє визначати оптимальні значення параметрів і способи підключення пристроїв, призначених для пригнічення нелінійних спотворень у радіоприймальних пристроях, та проектувати нелінійні адаптивні компенсатори для розширення їх лінійного динамічного діапазону з урахуванням специфіки функціонування бортових радіолокаційних систем.

Використання розробленої методології дозволить забезпечити запас за завадостійкістю бортових радіолокаційних систем до (8-10)%, що враховує можливі перспективи розвитку засобів радіоелектронної протидії на передбачуваний період експлуатації даних телекомунікаційних систем.

Очікуваний вигравш у величині відносного ймовірного показника якості бортових радіолокаційних систем при застосуванні розроблених науково-обґрунтованих рекомендацій становить (0,06-0,26) за відсутності завад, (0,61-0,69) в умовах радіоелектронної протидії (порівняно з бортовою радіолокаційною системою з типовим радіоприймальним пристроєм, ширина лінійного діапазону котрого не перевищує (40-50) дБ.

Застосування нелінійних адаптивних компенсаторів дозволяє отримати необхідні значення параметрів і способи підключення радіопристроїв, призначених для пригнічення нелінійних спотворень у РПП, що дозволить на (6-12)% підвищити надійність функціонування БРЛС.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження підтверджується їх співставленням та відсутністю протиріч із основними положеннями теорії статистичних рішень нелінійних радіопристроїв, а також збіжністю отриманих висновків із даними математичного моделювання та експериментальної перевірки.

Результати роботи впроваджені у Центральноукраїнському національному технічному університеті, Центрі прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля Національного центру управління та випробувань космічних засобів, Центральному науково-дослідному інституті навігації і управління, Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України, Полтавській філії ПАТ «Укртелеком», Державному університеті телекомунікацій, Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати дисертаційних досліджень отримані автором особисто та опубліковані з необхідною повнотою.

Із опублікованих у співавторстві наукових роботах для дисертаційної роботи взяті саме ті ідеї та положення, котрі особисто розроблені здобувачем. Матеріали досліджень опубліковано в 51 друкованій праці.

У роботах зі співавторством автору безпосередньо належить наступне. У [12] визначено різницю між апроксимативними і параметричними підходами до задачі ідентифікації та сферу їх коректного застосування; у [14] розроблено алгоритм виконання процесу ідентифікації параметрів нелінійних технічних

систем; у [15] визначено закономірності впливу негаусівських завад на обробку сигналів неконтрольованих випромінювань та розроблення алгоритмів ідентифікації; у [17] структуровано вплив похибок на навігаційні параметри; у [23] розроблена загальна концепція підвищення надійності радіотехнічних пристроїв; у [25] проведено системний аналіз інтегрального впливу нелінійності амплітудних характеристик реальних радіоприймальних пристроїв; у [26, 27] визначена залежність, форма та характеристики імпульсного розряду засобів навігації; у [28] запропоновано підходи щодо розширення динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв; у [29] розроблено метод визначення фазових шумів радіопристроїв та алгоритм аналізу впливу нелінійних процесів на показники якості бортових радіолокаційних систем; у [8, 13] врахування пружних деформацій під час обертання параболічного відбивача та їх вплив на результати експерименту.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень, практичні висновки та рекомендації, одержані в процесі досліджень, були апробовані, оприлюднені та отримали позитивну оцінку у ході:

V Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Полтава, 2014); Регіональної конференції МСЕ «Тенденції розвитку конвергентних мереж: рішення пост-NGN, 4G і 5G» (Київ, 2016); 67-ї, 68-ї та 69-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (Полтава, 2015-2017); Міжнародної науково-практичної конференції «Synergetics, mechatronics, telematics road machines and systems in educational process and science» (Харків, 2017); VIII та IX Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» (Київ, 2017); Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв» (Покровськ, 2017); XI Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» (Київ, 2017); XIII Міжнародної науково-технічної конференції «AVIA-2017» (Київ, 2017); XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of modern power engineering and automation in the system nature management» (Кременчук, 2017); VI Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (Київ, 2017); III Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (EMC-2017)» (Харків, 2017); III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль, 2017); Міжнародної науково-практичної конференції «Mechatronic systems: of innovation and engineering (MSIE-2017)» (Київ, 2017); Регіональної конференції МСЕ «Перспективи надання послуг на основі мереж пост-NGN, 4G і 5G. Організаційні та технічні рішення по їх побудові та захисту» (Київ, 2017); VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Modern power plants in transport and technologies and maintenance

equipment (MRPTTME-2017)» (Херсон, 2017); V Міжнародної науково-технічної конференції «Problems of informatization» (Черкаси, 2017); VI Міжнародної науково-практичної конференції «Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем» (Кропивницький, 2017); III Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (Полтава, 2017); X Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (Полтава, 2017); Міжнародної науково-практичної конференції «Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences» (Радам, Польща, 2017), а також на семінарах Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління та розширених засіданнях кафедри автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано після захисту кандидатської дисертації в 51 науковій праці, 36 з яких – одноосібні. Усього опубліковано 29 статей у наукових фахових виданнях та збірниках наукових праць, що входять до переліку рекомендованих МОН України [12-29], (17 з них одноосібні) у тому числі 11 статей – міжнародні публікації або у збірниках, що входять до міжнародних наукометричних баз [1-11].

Опубліковано 22 доповіді на наукових, науково-практичних і науково-технічних конференціях (семінарах) різного рівня [30-51], з яких 16 на міжнародних конференціях [30, 33, 35-38, 40, 41, 43-46, 48-51].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота містить 388 сторінок: 274 сторінки основного тексту, 79 рисунків і 13 таблиць у тексті, список використаних джерел із 267 найменувань та 9 додатків на 57 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** на основі предметної області дослідження і порівняльного аналізу відомих публікацій обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами та планами, визначено мету та завдання роботи.

Викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, а також наведено інформацію щодо структури й обсягу дисертації. Представлено відомості про впровадження основних положень роботи та публікації за темою досліджень, розкрито апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** вирішено перше наукове завдання, а саме: проведено дослідження існуючих та перспективних методів підвищення показників якості функціонування БРЛС із урахуванням їх основних особливостей і реальних умов застосування.

Встановлено, що в загальному випадку якість функціонування БРЛС досить повно характеризується множиною показників якості, вектор яких знаходиться у певній функціональній залежності від внутрішніх властивостей цієї БРЛС і характеристик зовнішнього середовища.

Аналіз показав, що основну увагу досліджень слід приділити впливу обмеженості динамічного діапазону РПП на показники якості БРЛС унаслідок нелінійності його АХ. Це призводить до значних амплітудних нелінійних спотворень радіосигналу на його виході, що проявляється в зменшенні коефіцієнта передачі РПП, а також у появі додаткового нелінійного шуму.

Показано, що більшість методів вирішення зазначених нелінійних задач дуже специфічні і можуть бути використані для аналізу лише окремих властивостей порівняно вузького класу нелінійних радіотехнічних систем, що суттєво обмежує реальні можливості синтезу і проектування РПП деякою шириною динамічного діапазону, котра дозволяє забезпечити необхідні значення показників якості БРЛС у заданому зовнішньому ЕМО.

Встановлено, що лінійний динамічний діапазон РПП БРЛС як правило не перевищує 40-50 дБ, тому ймовірність порушення нормальної роботи БРЛС досить висока і становить 0,16-0,33 за відсутності завад і 0,58-0,66 в умовах РЕП. Це викликає необхідність розширення динамічного діапазону РПП.

Доведено, що найбільш ефективними є методи, котрі за рахунок пригнічення нелінійних спотворень дозволяють збільшувати верхню межу динамічного діапазону РПП без зміни його коефіцієнта передачі. Загальним для цих методів є наявність фільтра з апріорно визначеними характеристиками й сталими часу.

Встановлено, що майже всі лінійні способи розширення динамічного діапазону РПП є постійно ввімкненими (жорсткими) заходами захисту РПП. Відомі методи дозволяють знижувати вибірковий рівень гармонік та мають досить низьку точність пригнічення нелінійних спотворень і малу швидкодію. Крім того, синтезовані пристрої не повною мірою адаптивні, що значно погіршує характеристики точності та суттєво обмежує їх функціональні можливості.

Звідси впливає актуальність розробки адаптивних способів розширення лінійного динамічного діапазону РПП БРЛС, котрі були б вільні від згаданих вище недоліків відомих детермінованих способів.

Задача адаптивного розширення лінійного динамічного діапазону РПП може бути успішно вирішена лише на основі адекватного опису складних РП високого порядку з максимально повним і точним урахуванням їх нелінійних і динамічних властивостей.

Головною проблемою на етапах проектування та експлуатації РПП БРЛС є зменшення впливу нелінійних інерційних процесів.

Для ґрунтовного розроблення методологічних основ компенсації впливу

нелінійностей АХ реальних багатокаскадних РПП на показники якості БРЛС і синтезу нелінійних адаптивних компенсаторів, проведена порівняльна оцінка основних методів аналізу нелінійних радіотехнічних систем.

Проведені дослідження довели, що функціональний метод є найбільш зручним та результативним теоретичним методом для дослідження зазначених процесів у РПП БРЛС.

Він заснований на представленні вихідного сигналу нелінійного РП у вигляді функціонального ряду Вольєрра (1) від вхідного впливу

$$y(t) = \sum_{i=1-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h'_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i, \quad (1)$$

або в багатомірній комплексній площині

$$\begin{aligned} Y(S_1, S_2, \dots) &= \sum_{n=1}^{\infty} H_n(S_1, \dots, S_n) \prod_{i=1}^n X(S_i) |_{S_i = j2\pi f_i}, \quad \forall i \in [1, 2, \dots] = \\ &= Y(f_1, f_2, \dots) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n(f_1, \dots, f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i), \end{aligned} \quad (2)$$

де $x(\cdot), y(\cdot), X(\cdot), Y(\cdot)$ – відповідно, вхідний і вихідний сигнали й їх перетворення Лапласа (Фур'є);

$h'_n g(\cdot), H_n(\cdot)$ – ядро Вольєрра n -го порядку у часовій і багатовимірній комплексній площині, відповідно (ядро Вольєрра радіопристрою зазвичай називають його нелінійною передавальною функцією (НПФ));

$S_i(f_i)$ – аргумент багатомірного перетворення Лапласа (Фур'є);

У процесі практичного використання функціонального методу центральною і найбільш складною проблемою є визначення ядер Вольєрра (НПФ), котрі повністю й однозначно описують властивості нелінійного РП і не залежать від виду вхідних впливів.

У зв'язку з цим проведений змістовний аналіз відомих на сьогодні методів визначення ядер Вольєрра.

Однак, відомий математичний апарат має обмежені можливості для розробки жорстких обґрунтованих вимог до характеристик БРЛС. Це пояснюється ускладненнями, пов'язаними з оцінкою впливу нелінійних динамічних процесів на стійкість і пропускну спроможність НВЧ і ВВЧ сигналів за допомогою традиційних наукових положень.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про недостатню ефективність відомого науково-методичного апарату для конструктивного аналізу нелінійних динамічних процесів БРЛС.

Також встановлено, що підвищення якості функціонування БРЛС до належного рівня не можна досягти без урахування впливу проміжної ланки – середовища розповсюдження радіохвиль. Під час їх поширення у природних трасах, середовище є тією ланкою радіосистеми, котра практично не піддається управлінню у реальному зовнішньому ЕМО.

Доведено, що трансіоносферна ділянка розповсюдження радіохвиль, з точки зору впливу на показники якості функціонування БРЛС, має вагомі нелінійні недетерміновані характеристики.

Збурення іоносфери здатні викликати завмирання не лише загального типу, а й частотно-селективні, що призводить до випадкових флуктуацій. Як наслідок, відбувається додаткове зниження завадостійкості РПП БРЛС.

Визначено, що забезпечення необхідних показників якості ТС в умовах збурень іоносфери можливе тільки за рахунок удосконалення методів часткового усунення або компенсації впливу іоносферного середовища на поширення радіосигналів.

Встановлено, що на даний момент не існує таких методів, котрі давали б якісний результат при застосуванні їх в околі антенного відсіку носія БРЛС.

Усі заходи та засоби, що використовуються, пов'язані або з підвищеними масогабаритними показниками, або зі значними енергетичними витратами, або із погіршенням аеродинаміки носія БРЛС.

На основі проведених досліджень сформульована науково-прикладна проблема теоретичного обґрунтування і розробки методології підвищення якості функціонування БРЛС у заданому зовнішньому ЕМО.

У **другому розділі** отримано другий науковий результат – подальший розвиток методу аналізу впливу нелінійних процесів у багатокаскадних радіоприймальних пристроях.

У процесі досліджень виконано синтез алгоритму визначення ядер Вольтерра зведеного нелінійного аналітичного оператора з застосуванням розробленого методу нелінійних вхідних сигналів для визначення НПФ широкого класу одномірних та багатомірних РП.

НПФ n – го ($n = 1, 2, \dots$) порядку знаходяться так:

$$[H_n] = [a^*]^{-1} [F_n] = [a^*]^{-1} \{ [F_n^{II}] - [F_n^I] \}. \quad (3)$$

де $[H_n]$ – матриця НПФ n – го ($n=1, 2, \dots$) порядку; $[1]$ – одинична матриця;

$[F_n][x]^n = [x_n]$ – матриця нелінійних вхідних сигналів 2 – го порядку, кожен із яких записується в рядках матриці $[F_n]$ з такими ж номерами, як і рядки матриці $[a]$, де знаходяться нелінійні елементи, котрі породжують дані нелінійні вхідні сигнали.

Зірочка (*) означає, що лінійні елементи вихідної матриці залишаються, а на місці її нелінійних елементів розташовані тільки їх лінійні складові з розкладання характеристик даних елементів у ряд Вольтерра.

Розроблено алгоритм знаходження ядер Вольтерра оберненого нелінійного оператора

$$\Gamma_k(S_1, \dots, S_k) = \frac{1}{H_1(S_1 + \dots + S_k)} \left[-F_k^1(S_1, \dots, S_k) \right], \quad (4)$$

де $F_k^1(\cdot)$ – нелінійний вхідний сигнал, причому $F_n^1 = \sum_{m=2}^n H_m \Gamma_{n,m}$, $n = 2, 3, \dots$

$$\Gamma_{m,n} = \sum_{i=1}^{n-m+1} \Gamma_i \Gamma_{n-i,m-1}, \quad \Gamma_{m,m} = \Gamma_1^m; \quad \Gamma_{m,m-1} = (m-1)\Gamma_1^{m-2}\Gamma_2; \dots; \Gamma_{m,1} = \Gamma_m.$$

Показано, що ядра Вольєрра отримані за допомогою формули (4) повністю збігаються з відомими результатами, однак визначаються значно простішим і коротшим шляхом.

Даний підхід дозволяє суттєво розширити область практичного застосування функціонального методу.

Розроблена зручна методика представлення та дослідження складних нелінійних РП високого порядку за допомогою модифікованих структурних матриць систем (СМС).

Використовуючи метод СМС для визначення НПФ із виразу (3), можна записати $[\tilde{a}^*] \cdot [H_n] = [F_n]$, $n = 2, 3, \dots$, де $[\tilde{a}^*]$ – структурна матриця системи, у котрій усі недіагональні елементи мають протилежні знаки порівняно з відповідними елементами матриці $[a^*]$.

Для спрощення застосування методу СМС, котрий вимагає багаторазового розв'язання рівнянь для різних вхідних впливів, розроблено метод модифікованих СМС.

Якщо використовувати звичайні матричні алгоритми, кількість обчислювальних операцій зростає пропорційно кубу порядку РП, а для методу модифікованих СМС число обчислювальних операцій збільшується пропорційно лише першому ступеню даного порядку.

Для n -каскадного з'єднання РПП ($n = 2, 3, \dots$), на основі методу модифікованих СМС, динамічний діапазон D за перехресними та інтермодуляційними спотвореннями визначається відповідно

$$D_n = \frac{1}{|X_{\min}(f_i)|} \sqrt{K_i \left| \frac{\prod_{e=i}^1 H_{e1}(f_i)}{\sum_{j=1}^i \left[\prod_{l=n}^{j+1} H_{l1}(f, f_1, -f_2) \right] H_{j3}(f, f_1, -f_2) \prod_{i=1}^3 \left[\prod_{K=j-1}^1 H_{K1}(f_i) \right]} \right|}, \quad (5)$$

$$D_i = \frac{1}{|X_{\min}(f')|^{2/3}} \sqrt[3]{K_e \left| \frac{\prod_{e=i}^1 H_{e1}(f_i)}{\sum_{j=1}^i \left[\prod_{l=m}^{j+1} H_{l1}(f_1, f_2, -f_3) \right] H_{g3}(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 \left[\prod_{K=j-1}^1 H_{K1}(f_i) \right]} \right|}, \quad (6)$$

де $H_{ji}(\cdot)$ – НПФ i -го ($i = 1, 3$) порядку j -го ($j = 1, 2, \dots, n$) каскаду, причому першими вважаються вхідні каскади РПП.

Із формул (5) та (6) випливає, що $D_n(D_i)$ менше $D_{jn}(D_{ji})$ для всіх j , де $D_{jn}(D_{ji})$ – динамічний діапазон j -го каскаду.

У разі, коли динамічний діапазон вхідних впливів ширше, ніж у РПП, то для їх узгодження необхідно розширити діапазони каскадів, що досягається зменшенням їх НПФ третього порядку.

Якщо динамічні діапазони всіх каскадів радіоприймальних пристроїв рівні між собою і дорівнюють динамічному діапазону вхідних впливів, то для узгодження n -каскадного РПП із зазначеними впливами необхідно зменшити величину нелінійних передавальних функцій третього порядку i -го каскаду j -їх каскадів у m_j разів ($m_j = m_{jn}, m_{ji}$).

Це еквівалентно розширенню динамічного діапазону j -го каскаду, причому його ступінь визначається наступним чином:

$$\{D_{jn}\}' = D_{jn} \sqrt{m_{jn}}; \quad \{D_{ji}\}' = D_{ji} \sqrt[3]{m_{ji}}. \quad (7)$$

Вибір величин коефіцієнтів m_j в області, котра визначається формулами (7), створює теоретичну основу для оптимізації багатокаскадних РПП за заданими критеріями.

Передумова для визначення мажоритарних вимог до динамічного діапазону каскадів РПП знайдена зі співвідношень

$$d_{jn} = \frac{(\Delta f_{exj})^{2/3} (\Delta f_{auxj})^{1/3}}{\Delta f_{iz}}; \quad d_{ji} = \frac{\Delta f_{exj}}{\Delta f_{iz}}, \quad (8)$$

де Δf_{exj} – смуга пропускання по входу j -го каскаду РПП, рівна смузі пропускання за виходом $(j-1)$ -го каскаду;

Δf_{auxj} – смуга пропускання по виходу j -го каскаду, рівна смузі пропускання за виходом $(j+1)$ -го каскаду;

Δf_{iz} – смуга частот, необхідна для прийому радіолокаційних сигналів із заданою якістю.

У загальному випадку, коли динамічні діапазони окремих каскадів РПП не рівні між собою і / або не рівні динамічному діапазону вхідних впливів (D_{ex}), то необхідна степінь достатності величини НПФ третього порядку j -го каскаду може бути знайдена з наступної формули $\eta_j = r_j \cdot n_j$.

Мажоритарні інтегральні вимоги до ширини динамічного діапазону за перехресними та інтермодуляційними спотвореннями визначаються так:

$$\{D_{jn}\}_{\Sigma}' = D_{jn} \sqrt{m_{jn}} \sqrt{r_{jn}} d_{jn}; \quad \{D_{ji}\}_{\Sigma}' = D_{ji} \sqrt[3]{m_{ji}} \sqrt[3]{r_{ji}} d_{ji}. \quad (9)$$

$$\text{де } r_i = r_{jn} \cdot r_{ji}; \quad r_{jn} = \left[\frac{D_{ex}}{D_{jn}} \right]^2, \quad r_{ji} = \left[\frac{D_{ex}}{D_{ji}} \right]^3; \quad m_j = m_{jn} \cdot m_{ji}.$$

Необхідно відзначити, що питання про узгодження РПП БРЛС із динамічним діапазоном вхідних впливів може бути остаточно й досить обґрунтовано вирішене лише на основі детального дослідження впливу нелінійних процесів у РПП на показники якості БРЛС.

Доведено, що нелінійні властивості РПП проявляються у зменшенні рівня радіолокаційних сигналів і появи на виході БРЛС нелінійних шумів.

Фазові шуми внаслідок АФК у РПП, із урахуванням властивості нелінійних функціоналів Вольтерра (2), можуть бути визначені з формули

$$\Delta\varphi = \arg\{H_3(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 [S(f_i) + M(f_i)]\}. \quad (10)$$

Використанням характеристики фазових шумів із (10) встановлено, що вони впливають на когерентні БРЛС, а амплітудні нелінійні спотворення погіршують функціонування практично всіх типів БРЛС.

Це призводить до зниження відношення сигнал/шум на виході РПП порівняно з указаним відношенням на його вході. Тоді відносне зменшення коефіцієнта передачі РПП має вигляд

$$R(f) = 1 - \left| \frac{H_3(f_1, f_1, -f_1) \{S(f) [S(f_1) S(-f_1) + M(f_1) M(-f_1)]\}}{H_1(f) [S(f) + M(f)]} \right|. \quad (11)$$

Із урахуванням (11) нелінійний шум описується виразом вигляду

$$J(f) = \left| \{H_3(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 [S(f_i) + M(f_i)]\}^* \right|. \quad (12)$$

Формула (11) характеризує нелінійні явища типу блокування і зниження чутливості РПП, а вираз (12) описує перехресні та інтермодуляційні шуми.

У процесі оцінювання показників якості БРЛС введено поняття ефективного відношення сигнал/шум $\rho_{ef}(\cdot)$ на вході еквівалентно лінійного РПП.

Отже, РПП умовно вважаються лінійними із передавальною функцією $H_1(\cdot)$, а складові нелінійних спотворень необхідно перерахувати відносно його входу.

На основі (11) і (12) та одночасності зниження коефіцієнта передачі РПП і виникнення нелінійних шумів вираз для $\rho_{ef}(\cdot)$ набуває вигляду

$$\rho_{ef}(f) = \frac{|S(f)|R(f)}{|N_0(f) + M(f)| + J(f)/|H_1(f)|} = \rho(f)\gamma(f), \quad (13)$$

де $N_0(\cdot)$ – внутрішні шуми РПП, перераховані на його вхід;

$$\rho(f) = \frac{|S(f)|}{|N_0(f) + M(f)|} \text{ – миттєве відношення сигнал/шум на вході РПП;}$$

$$\gamma(f) = \frac{|N_0(f) + M(f)|R(f)}{|N_0(f) + M(f)| + J(f)/|H_1(f)|} \text{ – коефіцієнт погіршення}$$

відношення сигнал/шум внаслідок нелінійності АХ РПП ($0 \leq \gamma \leq 1$).

Вплив нелінійності АХ РПП, за умови заданої імовірності хибної тривоги, включає відношення сигнал/шум та, згідно з (13), його можна оцінити за формулою

$$p_d = \exp\left[\frac{\ln Q}{1 - \rho^2(f)\gamma^2(f)}\right], \quad (14)$$

де Q – задана імовірність хибної тривоги.

Нелінійні процеси в РПП призводять до погіршення інформаційних властивостей БРЛС унаслідок зниження розрізнявальної здатності і зменшення числа розрізнявальної градації сигнальної функції.

Важливою характеристикою завадостійкості БРЛС є мінімальна дальність пригнічення, тому з урахуванням (12) отримано співвідношення, котре дозволяє оцінити вплив нелінійних процесів на мінімальну дальність пригнічення БРЛС

$$L_{\min} = L_{\min \text{ лін}} \gamma^{0,5}(f). \quad (15)$$

У випадку, коли станція завад розташована у центрі смуги огляду БРЛС, площа зони пригнічення, з урахуванням (15), визначається так

$$\delta_n = \delta_{n \text{ лін}} \gamma^{-2}(f). \quad (16)$$

Отримані результати свідчать про помітний вплив нелінійності АХ реальних РПП на показники якості БРЛС.

Звідси випливає необхідність пригнічення цих процесів, перш за все зниження рівня нелінійних спотворень третього порядку.

Для визначення величини γ , згідно з (13), знайдені НПФ першого і третього порядків n -каскадного ($n = 1, 3, \dots$) РПП за допомогою розробленого методу модифікованих структурних матриць систем

$$H_1(f) = \prod_{l=n}^1 H_{l1}(f), \quad (17)$$

$$H_3(f_1, f_2, -f_3) = \sum_{j=1}^n \left[\prod_{m=n}^{j+1} H_{m1}(f_1 + f_2 - f_3) \right] H_{j3}(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 \left[\prod_{k=j-1}^1 H_{ki}(f_i) \right]. \quad (18)$$

де f_1, f_2, f_3 – частоти вхідного впливу, причому частота f повинна потрапляти в $\Delta f_{\text{вх}}$, а частоти f_1, f_2, f_3 повинні потрапляти в смугу пропускання по входу радіопристрою $\Delta f_{\text{вх}}$.

Встановлено, що спектр вхідних впливів є різницеvim, найбільш небезпечним та досить імовірним випадком функціонування БРЛС за наявності маскуючих шумових завад.

Із залежності розрізнявальної здатності бортових радіолокаційних систем від динамічного діапазону розглянутих впливів визначено, що має виконуватись наступна нерівність

$$D_{\text{вх}} \leq 1,3 \cdot D_{\text{РПП}},$$

отже $\Delta x' = \Delta x'' = 2,28 \text{ дБ}$, а $\Delta x''' = -17,72 \text{ дБ}$.

Використовуючи знайдені значення $\Delta x'$, $\Delta x''$ та $\Delta x'''$, встановлено, що ймовірність прямого проходження завад на вихід РПП становить $p_3 = \Delta f_{\text{вхРПП}} / \Delta f_{\text{вхРПП}}$.

Таблиця 1

Значення відносного ймовірного показника якості БРЛС при різних величинах ймовірності впливу завад із традиційними типовими характеристиками

$D_{\text{РПП}}$, дБ	p_1				
	0	0,25	0,5	0,75	1
40	0,73	0,60	0,49	0,38	0,30
50	0,93	0,77	0,63	0,50	0,38

Для наочності результатів аналізу й зручності обчислень уведено поняття відносного ймовірного показника якості БРЛС

$$p/p_0 = (1 - p_1)p_2 + p_1[(1 - p_3)p_4 + p_3p_5], \quad (19)$$

де p – імовірність практичної реалізації значення узагальненого показника якості БРЛС не гірше заданого рівня;

p_1 – імовірність впливу завад на вхід РПП БРЛС;

p_2 – імовірність відсутності завад на вході РПП;

p_3 – імовірність прямого проходження завад на вихід РПП;

p_4 – імовірність позасмугового впливу завад.

Доведено, що лінійний динамічний діапазон відомих типових РПП бортових радіолокаційних систем не перевищує 40-50 дБ, тому, як видно з (19), p/p_0 від D_{pnn} , лежить у межах від 0,3 (коли $p_1=1$, $D_{РПП}=40$ дБ) до 0,93 (коли $p_1=0$, $D_{РПП}=50$ дБ).

Із аналізу результатів, наведених у табл. 1, видно, що якість функціонування відомих БРЛС не задовольняє сучасні вимоги, котрі висуваються до РПП. Особливо це помітно в умовах РЕП, що характеризує найбільш імовірні умови застосування БРЛС.

Тому достатньо актуальним є розроблення нових ефективних і, насамперед, адаптивних методів розширення лінійного динамічного діапазону РПП.

У **третьому розділі** вирішено друге та четверте наукове завдання й розроблено метод функціональної залежності показників якості бортових радіолокаційних систем від ширини лінійного динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв.

Синтезовано функціональний метод аналізу нелінійних інерційних процесів у радіопристроях та досліджено їх вплив на завадостійкість БРЛС.

При цьому досліджено особливості сигналів неконтрольованих випромінювань (НВ) та побудовано математичні моделі ідентифікації процесів бортової радіонавігаційної апаратури.

Використання амплітуди й початкової фази сигналу з цією метою не можливе через суттєвий вплив середовища поширення радіохвиль.

Найбільш інформативним є характер зміни частоти в часі, пов'язаний із нестабільністю частоти бортових генераторів завдання. Він залежить від поекземплярних особливостей кожного бортового генератора, що і є основою ідентифікації.

Встановлені джерела нестабільності частоти БРЛС – ”довготривалі”, котрі мають систематичні зміни частоти, що відбуваються за рахунок старіння матеріалів, а також детерміновані періодичні відхилення частоти, котрі виникають унаслідок паразитної частотної модуляції та ”короткотривалі” нестабільності, пов'язані зі зміною частоти через випадкові флуктуації.

Для параметричної ідентифікації НВ обґрунтовано вибір динамічної моделі процесів нестабільності частоти.

Зазначена модель являє собою опис проходження білого шуму через чотириполюсник за допомогою системи диференціальних рівнянь 1-го порядку.

Позначивши коефіцієнт передачі чотиріполіусника дробово-раціональною функцією $K_f(p)$, а білий шум, котрий збуджує чотиріполіусник $\xi(t)$, процес із раціональним спектром можемо представити матричним диференціальним рівнянням

$$\dot{x}(t) = F(t)X(t) + G(t)\xi(t), \quad (20)$$

де $X(t) = [x(t) \dots x_m(t)]$ – вектор стану, $x(0) = x_0$; $t \in [0; T]$ – інтервал спостереження; матриця $F(t)$ визначається видом нестабільності;

$G(t)$ – матриця інтенсивностей формуючих шумів.

Нестабільність частоти визначається як $\varphi(t) = H(t)x(t)$, де $H(t)$ – вихідна матриця.

Схема формування сигналу нестабільності частоти опорного генератора, згідно з (20), представлена на рис. 1.

Пунктир вказує на блоки, котрі виконують функцію фільтра формування з коефіцієнтом передачі $K_f(p)$.

Вимоги до точності апроксимації визначають порядок моделі.

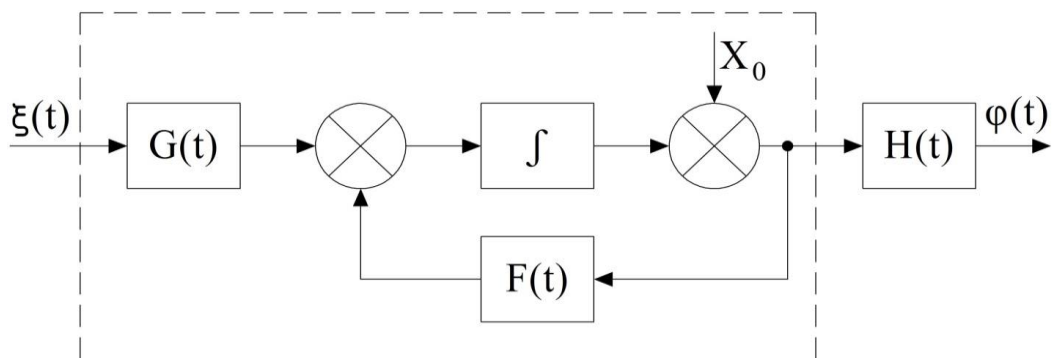


Рис. 1. Функціональна схема формувача сигналу нестабільності частоти опорного генератора

Для зручності практичних розрахунків нестабільність представлена у вигляді трьох компонент. Перша компонента $g(t)$ повільно змінюється й її можна трактувати, як детерміновану на даній вибірці. Другою компонентою $m(t)$ є функція, котра повільно змінюється відносно $g(t)$. Її можна вважати локальним стаціонарним процесом випадкового характеру з великим часом кореляції. Компонента $n(t)$ – швидкі флуктуації частоти, стаціонарні за всією вибіркою, але з малим часом кореляції.

Процес нестабільності характеризується відходами фази $\varphi(t)$ і має вигляд:

$$\varphi(t) = g(t) + m(t) + n(t). \quad (21)$$

Виходячи з апіорного представлення процесу нестабільності (21) за умови, що параметри на тривалому інтервалі постійні, неперервну модель можемо представити у вигляді рис. 2.

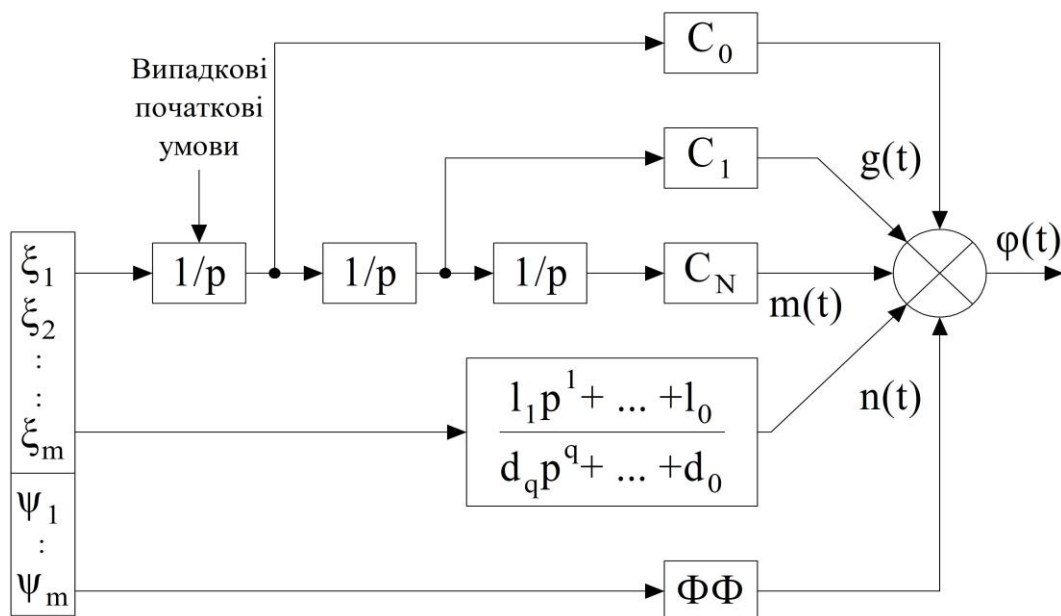


Рис. 2. Модель процесу нестабільності частоти генератора завдання

Джерела збудження моделі $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$; $\psi_1 \dots \psi_m$ являють собою гаусівський розподіл з одиничною спектральною щільністю. Робота окремих блоків визначається відповідними флуктуаціями передачі у безперервному перетворенні Лапласа з оператором $p = \lambda + i\omega$.

Альтернативний напрямок полягає в розбитті наявної вибірки на невеликі ділянки (по 3-5 точок) і зсувові цих точок від нульового відліку до n -го відліку (ковзне спостереження). Утворені в цьому процесі окремі оцінки складають ряд, за котрим розраховуються прогнозовані оцінки параметрів процесу $m(t)$.

У випадку великого значення "ковзного вікна" значення $m(t)$ виступають у якості завад. Коли довжина вікна мала, вони, навпаки, можуть істотно впливати на значення оцінок параметрів $m(t)$.

У роботі показано, що існує певна міра вибору "ковзного вікна" залежно від характеристики складової $m(t)$. Алгоритм ідентифікації на основі динамічних моделей розроблено у вигляді рекурентних співвідношень як для критерію максимуму правдоподібності, так і для критерію максимуму апостеріорної імовірності розподілу параметра, котрий оцінюється.

Однак, якщо невідомі параметри розподілені рівномірно або є значна невизначеність в апіорному розподілі, то алгоритми ідентифікації для названих вище критеріїв еквівалентні.

Для складових $m(t)$ та $n(t)$ будуть справедливі такі вирази:

$$X(t) = Fx(t) + Gg(t), \quad m(t) = H(t)x(t), \quad (22)$$

а рівняння спостерігача можна представити у вигляді $Z(t) = H_1 m(t) + n(t)$, де $Z(t) = \varphi(t) - g(t) = m(t) + n(t)$; H_1 – матриця спостережень для випадку $H_1 = [100 \dots 0]$, що розглядається.

Оптимальна оцінка вектора $\hat{x}(t)$ має вигляд $\hat{x}(k+1) = \Phi \hat{x}(k) + K(k+1)[Z(k+1) - H_1 \Phi \hat{x}(k)]$, де Φ – перехідна матриця, а $K(k+1)$ – матриця коефіцієнтів підсилення, (k) – номер вимірювання, котрий надходить в обробку.

Матричний коефіцієнт підсилення визначається з рівняння Рікатті, як функція характеристик шумів $g(k)$, матриць F , H та G рівняння (22).

Отже, дослідження сигналів НВ й аналіз математичних моделей обробки інформації дозволяє розробити більш досконалі за критерієм швидкодії нові методи ідентифікації.

Розширення смуги пропускання РПП дає змогу ближче підійти до теоретичної величини пропускну здатності радіоканалу.

Для малої залежності згаданої величини від відношення сигнал-шум на його вході $h_{ef} \ll 1$ отримано, що $C = \Delta f \log_2(1 + h_{ef}) \approx 1,443 \Delta f h_{ef}$ прямопропорційне відношенню h_{ef} та ширині смуги частот Δf . За умови $(h \gg 1)$ маємо, що $C = \Delta f \log_2(1 + h_{ef}) \approx \Delta f \log_2 h_{ef}$. При цьому об'єм інформації, котра передається, можна зберегти шляхом розширення Δf або, навпаки, шляхом звуження смуги каналу за рахунок збільшення h_{ef} .

Встановлено залежність пропускну здатності від ширини смуги каналу, при цьому граничні можливості системи зв'язку визначено у вигляді співвідношення $C = \Delta f \log_2 \left(\frac{P_0}{\Delta f N_0} \right)$, де P_0 – потужність шуму, N_0 – спектральна щільність потужності шуму.

Зі збільшенням Δf пропускну спроможність монотонно зростає, асимптотично прямує до граничного значення

$$C_\infty = \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} C = \frac{P_0}{N_0} \log_2 e = 1,443 \frac{P_0}{N_0}.$$

Під час наближення швидкості прийому-передачі радіосигналів до теоретичної пропускну здатності покращення системи зв'язку дає усе менший ефект (максимально можливе поліпшення не перевищує 10 дБ), тому отриману ефективність БРЛС за швидкодією слід вважати достатньо високою.

Для оцінки завадостійкості БРЛС, окрім розгляду динамічних характеристик та характеристик точності системи, враховано вплив нелінійних процесів на якість прийому/передачі інформації. Для цього проведені дослідження нелінійних інерційних спотворень інформаційних сигналів у плазмовому іоносферному середовищі розповсюдження радіохвиль.

У четвертому розділі вирішено п'яте наукове завдання проблеми дисертаційних досліджень й отримано четвертий науковий результат. Розроблено метод локального зниження щільності іоносферної оболонки навколо антенного відсіку носія БРЛС за рахунок її взаємодії зі штучно створеною плазмою від'ємного випромінювання високої інтенсивності. Показано, що існуючі методи підвищення завадостійкості зв'язку базуються на підсиленні потужності радіосигналів та перенесенні їх спектрів на інші частоти. При цьому, між деякими РПП відбувається досить складна обробка сигналів для зменшення перехресних завад між сигналами від різних ретрансляторів сигналу та підвищення завадостійкості системи в цілому. За порівняно невисокої надійності та якості функціонування ТС це призводить до зниження дальності їх дії, особливо у випадку впливу РЕП.

Запропоновано інноваційний підхід щодо безперешкодного проходження радіосигналів через іоносферне середовище за допомогою методу локального фізичного зниження концентрації електронів високотемпературної іоносферної плазми, шляхом впливу на неї штучно створеним низькотемпературним від'ємним випромінюванням (плазмою).

Розроблено методи утворення низькотемпературної плазми високої інтенсивності з незначним питомим енерговнеском, що є надзвичайно критичним для носія БРЛС.

У результаті досліджень властивостей та ефекту додавання великої кількості коротких розрядів, що жевріють, розроблено метод збільшення об'єму плазми від'ємного випромінювання.

Важливою рисою цього методу є те, що для збільшення поперечних розмірів плазми використовується компланарний ефект, а для збільшення повздовжнього розміру використовується локалізаційний ефект, рис. 3.

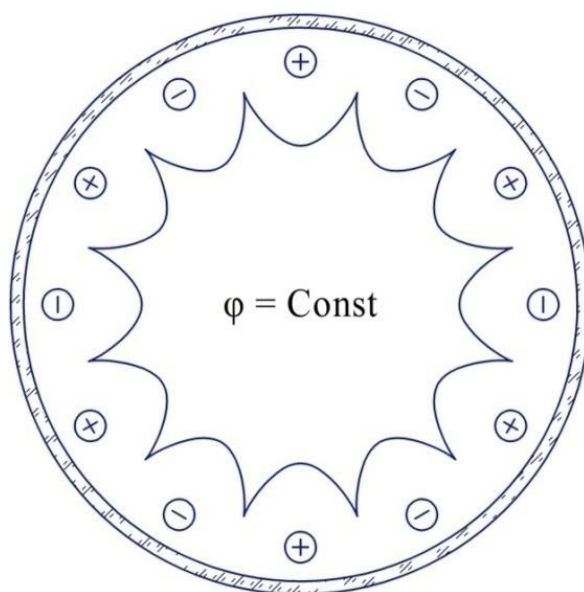


Рис. 3. Геометрія електричного поля локалізованого розрядного проміжку: + стрижневі аноди; - стрижневі катоди

На основі вимірних характеристик встановлено, що енерговнесок для утворення одиниці об'єму локалізованої плазми в 3,2 рази менший, ніж для виникнення плазми звичайного від'ємного випромінювання та значно менший, ніж для утворення плазми позитивного стовпа.

Згідно із зондовими дослідженнями, котрі проведені в плазмі локалізованого розряду в різних напрямках, встановлено, що дана плазма є однорідною та еквіпотенціальною.

Розроблено спосіб збільшення розмірів плазми зі змінними її властивостями.

Розроблений науково-методичний апарат враховує вплив властивостей трансіоносферного тракту і забезпечує компенсацію поглинання, відбиття і розсіювання радіосигналу та дозволяє підвищити завадостійкість функціонування радіообладнання носія БРЛС у середньому на 23%.

Отримані результати вказують на правильний напрямок досягнення поставленої мети дисертаційної роботи.

У **п'ятому розділі** вирішено шосте наукове завдання шляхом удосконалення моделі урахування впливу частотно-селективних властивостей трансіоносферного розповсюдження радіохвиль на завадостійкість радіоприймальних пристроїв.

Розроблена методика та виконане імітаційне моделювання і прогнозування завадостійкості РПП БРЛС в умовах неоднорідностей іоносферного середовища.

Проведений у роботі аналіз нелінійних інерційних процесів за допомогою функціонального методу дає змогу об'єднати результати оцінки завадостійкості некогерентного прийому радіосигналів за різних типів завмирань одним узагальненим співвідношенням

$$P_n = \frac{\gamma^2 + 1}{\eta_{чсз} \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp \left[- \frac{\eta_{чсз} \gamma^2 \bar{h}_0^2}{\eta_{чсз} \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \right]. \quad (23)$$

Вираз (23) залежить від значень частотних параметрів сигналів, що передаються ($f_0, \Delta f_0$), і фізичних параметрів іоносфери (β, n_e, L_0, z_e) та дозволяє розрахувати стійкість РПП БРЛС під впливом іоносферних збурень.

В імітаційній моделі коефіцієнт передачі трансіоносферного радіоканалу визначається як $\gamma^2 = \frac{\alpha^2}{2\sigma_b^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_\varphi^2) - 1}$, а коефіцієнт втрат за формулою

$$\eta_{чсз} = F_0 \left(\sqrt{2\pi} \frac{\Delta f_k}{\Delta f_0} \right) \left[1 + \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{\Delta f_0}{\Delta f_k} \right)^2 \right] - \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \left(\frac{\Delta f_0}{\Delta f_k} \right) \left\{ 2 - \exp \left[- \pi^2 \left(\frac{\Delta f_k}{\Delta f_0} \right)^2 \right] \right\}, \quad (24)$$

де $\Delta f_k = \frac{\sqrt{2}f_0}{\sigma_\varphi} = \frac{f_0^2 c}{80,8\pi\sqrt{L_0 z_e} \beta n_e}$ пов'язана з фізичними параметрами

іоносфери через величину σ_φ^2 .

У свою чергу, дисперсія флуктуацій фазового фронту хвилі на виході іоносферного шару отримана із наближення Ритова за умови, що спектр флуктуацій неоднорідностей у незбуреній іоносфері $\Phi_{\Delta n_e}(K)$ має ступеневий вигляд залежності $k=2\pi/l$ в інерційному інтервалі $l_m < l < L_0$ зі спектральним показником $\Phi_{\Delta n_e}(K) \sim K^{-p}$ ($p \approx 4$) та становить

$$\sigma_\varphi^2 \approx 2(\lambda r_e)^2 L_0 z_e \sigma_{\Delta n_e}^2 = 2 \left(\frac{80,8\pi}{c} \right)^2 L_0 z_e \left(\frac{\beta n_{em}}{f_0} \right)^2 (pa\delta^2).$$

Сама ж величина σ_φ^2 може набувати різних значень у залежності від кількісних змін β і n_{em} для різних широт і часу доби.

Прогнозування завадостійкості РПП БРЛС зводиться до обчислень імовірності виникнення похибки P_n , на основі наведених вище виразів, при заданих частотних параметрах сигналів (f_0 , Δf_0) і збільшенні фізичних параметрів іоносфери β і n_e під впливом збурюючих факторів.

За результатами моделювання завадостійкості РПП БРЛС в умовах збурень іоносфери та РЕП зроблені наступні рекомендації і висновки.

По-перше, за наявності навіть слабких збурень, характер завмирань прийнятих у РПП БРЛС радіосигналів дециметрового і сантиметрового діапазону довжин хвиль (в тому числі з $f_0 > 6$ ГГц) потребує збільшення енергетичного запасу існуючих радіоліній до 40 дБ.

Але запасу в 10 дБ сучасних БРЛС зазначених діапазонів не вистачить для забезпечення $P_0 \sim 10^{-5}$ в умовах збурень іоносфери, тому необхідно підвищити енергетичні характеристики апаратури БРЛС.

По-друге, у випадку сильних збурень іоносфери прийом радіосигналів БРЛС буде супроводжуватися виникненням частотно-селективних завмирань і енергетичними втратами $\eta_{чсз}$, відповідно до (24).

Для їх компенсації необхідно нарощувати енергетичний запас радіоліній (наприклад, для $f_0=1$ ГГц його слід збільшити на 20 дБ).

По-третє, використання міліметрового діапазону довжин хвиль та локального зниження щільності іоносферного шару дозволить суттєво підвищити стійкість РПП БРЛС за будь-якого ступеня збурень. Слід зауважити, що в умовах впливу сильних збурень іоносфери для забезпечення необхідної $P_0 \sim 10^{-5}$ також слід збільшити \bar{h}_0^2 приблизно на 20 дБ.

Оцінка завадостійкості на основі порівняння результатів експерименту з теоретичними даними наведена на рис. 4.

Аналіз отриманих результатів показав, що за рахунок оперативної оцінки поточного стану траси поширення НВЧ і ВВЧ радіохвиль із подальшим переходом від режиму оптимального когерентного прийому до автокореляційного і назад, відповідно за наявності або відсутності частотно-селективних завмирань, у радіолінії можна отримати вигравш за

завадостійкістю.

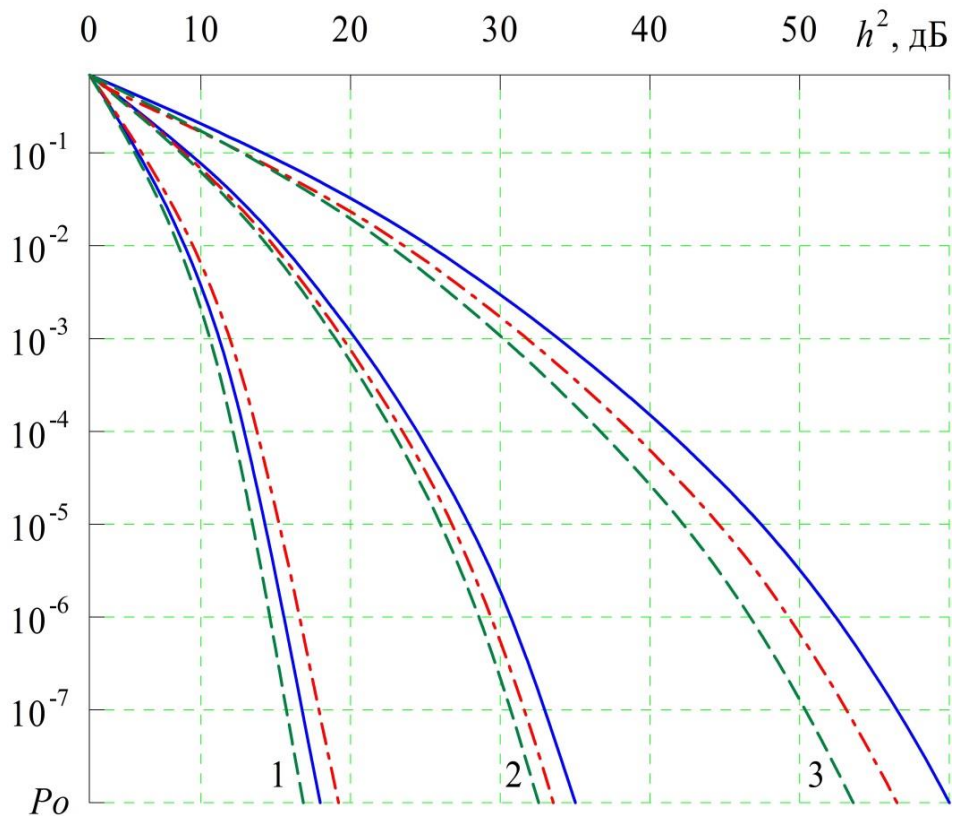


Рис. 4. Порівняльна оцінка завадостійкості адаптивної і традиційної системи виявлення сигналів (1 – $\Delta\varphi = 0^\circ$, 2 – $\Delta\varphi = 55^\circ$, 3 – $\Delta\varphi = 80^\circ$), де: суцільна лінія – прототип; пунктирна лінія – розрахункові значення; штрих-пунктирна лінія – результати експерименту

Цей вигравш, порівняно з існуючими системами, складе для відносної фазорізницевої модуляції сигналів 0,9 - 1 дБ за імовірності помилкового прийому 10^{-5} .

Отже, запропонований науково-методичний апарат дозволяє спрогнозувати стійкість РПП БРЛС, а також розробити науково обґрунтовані вимоги до енергетичних і частотних параметрів РПП БРЛС за заданого способу їх оброблення.

У **шостому розділі** вирішено сьоме та восьме наукове завдання та отримано шостий науковий результат.

Розроблено адаптивний метод компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях на основі застосування синтезованих нелінійних адаптивних компенсаторів для розширення лінійного динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв.

З метою формалізації задачі адаптивної компенсації (АК) нелінійних спотворень, вихід і вхід одномірного РП представлено в якості основного й опорного входів нелінійного адаптивного компенсатора, відповідно.

Зазначені входи названі адаптивними компенсаторами нелінійних спотворень (АКНС). Структурна схема одномірного АКНС зображена на рис. 5.

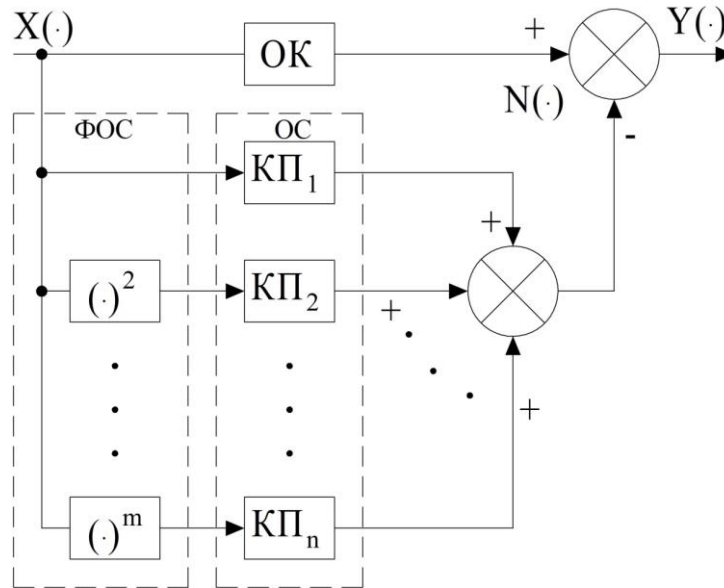


Рис. 5. Загальна структурна схема одномірного АКНС: ОК – основний канал; ФОС – формувач опорних сигналів; ОС – опорна схема; КП_n – n-й канал прийому радіосигналів

Вхідний сигнал X статистично пов'язаний тільки з вихідним сигналом Y та не корелюється з внутрішніми шумами N даного РП.

Очевидно, що структура АКНС повністю однозначно визначається способом опису нелінійних процесів РП і алгоритмом розв'язання задачі адаптивної компенсації нелінійних спотворень.

Відповідно до методу модифікованих СМС та з урахуванням методу нелінійних вхідних сигналів отримано, що для одномірних РП, загальний опорний вхід АКНС відокремлюється у формувачі опорних сигналів на m опорних входів, на кожен із котрих впливає окремий опорний сигнал.

Знайдено квазіоптимальний (наближено оптимальний) алгоритм рішення задачі АК нелінійних спотворень.

Для цього вихідний сигнал адаптивного пристрою (нелінійної системи з нестационарними параметрами) представлено у вигляді усіченого першими m членами параметричного ряду Вольтерра

$$\sum_{k=1}^m W_k(f_1, \dots, f_k) \prod_{j=1}^k X(f_j) \doteq \sum_{k=1}^m W_k(t) X_k, \quad (25)$$

де $W_k(\cdot)$ – параметрична НПФ k -го порядку (передавальна функція k -го адаптивного фільтра).

На виході АКНС утворюється сигнал помилки $\varepsilon(\cdot)$, що визначається так

$$\varepsilon(t, f_1, f_2, \dots) \doteq \varepsilon(t) = Y - \sum_{k=1}^m W_k(t) X_k \cong Y_c - \sum_{k=1}^m W_k(t) X_k. \quad (26)$$

Тоді варіант побудови адаптивної фільтрації, на основі методу мінімізації середньоквадратичної помилки (СКП) у комплексній диференціальній формі запису набуває вигляду

$$\frac{dW_k(t, f_1, f_2, \dots, f_k)}{dt} \doteq \frac{dW_k(t)}{dt} = 2e_k \mu \varepsilon(t) X_k^{\otimes}, \quad (27)$$

де μ – стала (коефіцієнт передачі кола ЗЗ), котра визначає стійкість і швидкість перебудови АКНС; ε_k – коефіцієнт пропорційності, чисельно дорівнює одиниці; знак \otimes – позначає комплексно сполучену величину.

Похибка компенсації АКНС визначена так

$$V_k(t, f_1, \dots, f_k) \doteq V_k(t) = H_k(t, f_1, \dots, f_k) - W_k(t, f_1, \dots, f_k). \quad (28)$$

Неважко побачити, що $\lim_{t \rightarrow \infty} V_k(t) = 0$, $\forall k \in [1, \dots, m]$, у свою чергу це означає, що $\lim_{t \rightarrow \infty} W_k(t, f_1, \dots, f_k) = H_k(f_1, \dots, f_k)$, $\forall k \in [1, \dots, m]$.

Отже, передавальні функції адаптивних фільтрів АКНС сходяться в часі до НПФ РП.

У результаті проведеного синтезу отримано принципове підтвердження можливості адаптивного розв'язку задачі компенсації спотворень у РП.

Проведена оцінка динамічних характеристик та точності АКНС з урахуванням внутрішніх шумів та неідеальності параметрів їх елементів.

Визначено, що динамічні властивості АК характеризуються сталою часу адаптації (перебудови) адаптивних фільтрів τ

$$\tau_{AKHC} = \frac{k_\tau m}{4\mu P_H}, \quad (29)$$

де P_H – потужність компенсації нелінійних спотворень; k_τ – коефіцієнт пропорційності.

Основною характеристикою якості АК є також точність адаптації, котра обмежується похибками оцінки градієнта ω_1 , а також похибками компенсації внаслідок запізнення адаптивних фільтрів ω_2 , тоді для АКНС маємо

$$\omega_1 = k_{\omega 1} \mu P_H, \quad \omega_2 = \frac{1}{\mu} \frac{k_{\omega 2} \sigma_H^2}{4\sigma_{\min}}, \quad (30)$$

де σ_n , σ_{\min} – відповідно СКП нелінійних спотворень і мінімальна СКП адаптації, котра реалізується у випадку оптимальної побудови адаптивних фільтрів; $k_{\omega 1}$, $k_{\omega 2}$ – коефіцієнти пропорційності.

Найвища якість адаптації ($\omega_1 + \omega_2 = \min$) забезпечується вибором оптимального значення μ , що знаходиться на основі виразів (30) та визначається за формулою

$$\mu_{opt} = \sqrt{\frac{k_{\omega 2} \sigma_n^2}{4k_{\omega 1} \sigma_{\min} P_n}}. \quad (31)$$

Для вдосконалення показників якості БРЛС проведено експеримент, на прикладі розширення лінійного динамічного діапазону вузькосмугового підсилювача, оскільки РП даного типу забезпечують основний внесок у нелінійні спотворення в РПП БРЛС.

Аналіз результатів експерименту показав, що вихід із ладу (відключення) адаптивного фільтра не призводить до зниження надійності (відмови) АКНС порівняно з надійністю РП.

Визначено, що внутрішні шуми АКНС ($N_{a \approx 40}$ мкВ) не погіршують експлуатаційні характеристики сигналу на виході, порівняно з шумовими характеристиками вихідного сигналу РП (вузькосмугового підсилювача – $N \approx 8$ мкВ).

Застосування АКНС третього порядку дозволило підвищити верхню межу лінійного динамічного діапазону по зниженню чутливості вузькосмугового підсилювача ($\Delta f = 2,5$ кГц) до гармонійного вхідного сигналу ($f_0 = 100$ кГц) з 1,2 мВ – по входу (12 мВ – по виходу) до 92 мВ – по входу (920 мВ – по виходу), що відповідає розширенню його лінійного динамічного діапазону з 63,5 дБ до 100,75 дБ, тобто на 37,25 дБ.

Експериментально підтверджені висновки теоретичного аналізу точності та динамічних характеристик АКНС й основні положення науково обґрунтованої методики їх проектування.

Це є доказом правильності проведених теоретичних досліджень якісних характеристик АКНС.

На основі забезпечення відносного ймовірного показника якості не нижче 0,99, діапазону робочих частот, швидкодії, допустимого рівня шумів та масогабаритних і енергетичних показників, розроблені практичні рекомендації для підвищення показників якості БРЛС.

Оскільки імовірність прямого проходження завод на виході РПП

$$p_3 \approx \frac{\Delta f_{вих РПП}}{\Delta f_{вх РПП}} = 0,01, \text{ динамічний діапазон РПП повинен бути не менше } 50 \text{ дБ,}$$

тобто

$$D_{РПП} \geq D_{РЛС}, \quad (32)$$

де $D_{РПП}$, $D_{РЛС}$ – динамічний діапазон РПП і радіосигналів, відповідно.

Тоді на основі результатів, отриманих у розділі 2, мажоритарні вимоги до динамічного діапазону кожного каскаду РПП БРЛС визначаються за формулою

$$D_i = D_{РПП} + 20 \lg \sqrt{n} + 20 \lg \frac{\Delta f_{\text{вх}}}{\Delta f_{\text{из}}}, \quad (33)$$

де n – кількість каскадів РПП.

Якщо під окремими каскадами розуміти тракти радіопроміжної і низької частоти, то $n=3$. Результати розрахунків за формулою (33) для типового РПП наведені в табл. 2

Таблиця 2

Вимоги до динамічного діапазону каскадів типового РПП когерентних БРЛС

Тип каскадів РПП	Динамічний діапазон каскадів РПП		
	Вихідний динамічний діапазон, дБ	Необхідний динамічний діапазон, дБ	Динамічний діапазон АКНС, дБ
Тракт радіочастоти (ТРЧ)	40-70	109,54	39,54-69,54
Тракт проміжної частоти (ТПЧ)	60-90	95,54	5,54-35,54
Тракт низької частоти (ТНЧ)	30-50	75,54	25,54-45,54

Отримані результати мають чітке фізичне трактування. Динамічний діапазон кінцевих каскадів РПП повинен визначатися динамічним діапазоном радіолокаційних сигналів.

Однак, унаслідок широкосмуговості вхідних каскадів РПП можливий позасмуговий нелінійний вплив завад.

Тому динамічний діапазон вхідних РП повинен певним чином відповідати динамічному діапазону завад.

Саме такі закономірності, котрі базуються на суворому кількісному аналізі, а не на якісних напівемпіричних міркуваннях, відмічаються в процесі використання розробленої методики узгодження багатокаскадних РПП із динамічним діапазоном вхідних впливів.

Кількісний вииграш у показниках якості БРЛС розробленої методології дозволяє підвищити значення відносного ймовірного показника якості БРЛС в умовах ЕМО до 0,99 (коли $p_3=0,01$).

Отже, очікуваний вииграш $\Delta(p/p_0)$ за рахунок практичного використання запропонованих рекомендацій, табл. 3, становить від 0,06-0,26 (коли $p_1=0$) до 0,61-0,69 (у випадку, коли $p_1=1$).

Очікуваний виграш у величині відносного ймовірного показника якості БРЛС внаслідок застосування розроблених практичних рекомендацій

$D_{РПП}$, дБ	p_1				
	0	0,25	0,5	0,75	1
40	0,26	0,39	0,5	0,61	0,69
50	0,06	0,22	0,36	0,49	0,61

Для порівняння, значення відносного ймовірного показника якості БРЛС із традиційними типовими характеристиками, табл. 1, достатньо низькі та знаходяться в межах 0,73-0,93 за відсутності завад ($p_1=0$) і 0,3-0,38 в умовах РЕП ($p_1=1$).

Розроблена методологія висуває менш жорсткі ($D_{РПП} = 40-60$ дБ), але більш диференційовані вимоги до динамічного діапазону каскадів РПП.

Практичне впровадження отриманих результатів дозволяє забезпечити досить великий та гнучкий запас за завадостійкістю БРЛС.

ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, котрі були обґрунтовані та сформульовані в ході виконання дисертаційної роботи, відповідно до поставленої мети, вирішує актуальну науково-технічну проблему, котра має важливе науково-практичне значення й направлена на розробку моделей та методів підвищення якості функціонування бортових радіолокаційних систем.

У процесі теоретичних та експериментальних досліджень отримано ряд нових теоретичних і науково-практичних результатів:

1. Розширені основи теорії й практики побудови бортових радіолокаційних систем із покращеними показниками якості їх функціонування, що включають у себе метод визначення науково обґрунтованих вимог до частотно-залежних параметрів як у цілому, так і окремих каскадів радіоприймальних пристроїв, що дозволяє визначити мажоритарні вимоги до динамічного діапазону телекомунікаційної системи.

2. Розроблено метод визначення нелінійних передавальних функцій (ядер Вольтерра) широкого класу багатомірних радіопристроїв за допомогою методу нелінійних вхідних сигналів та зручний алгоритм визначення ядер Вольтерра оберненого нелінійного аналітичного оператора, що дозволяє поліпшити конструктивні можливості функціонального методу та розширює сферу його практичного застосування.

3. Розроблено метод узгодження динамічного діапазону багатокаскадних

радіопристроїв бортових радіолокаційних систем із вхідними впливами, що враховує характеристики частотної вибірковості каскадів, а також статистичні та спектральні властивості радіосигналів та завад і дає змогу знаходити найбільш доцільні, з практичної точки зору, шляхи та методи вдосконалення телекомунікаційних систем із метою максимально повної реалізації їх потенційних можливостей у реальних зовнішніх умовах.

4. Розроблено метод дослідження нелінійних процесів у радіоприймальних пристроях за допомогою модифікованих структурних матриць систем, що дозволяє в умовах радіоелектронної протидії значно спростити аналіз систем високого порядку та необхідну кількість обчислювальних операцій, порівняно з відомими методами, приблизно в n^2 раз, де n – порядок системи, котра досліджується.

5. Розроблено метод компенсації впливу негативних чинників трансіоносферного каналу на радіосигнал, що забезпечує підвищення завадостійкості функціонування радіообладнання носія бортової радіолокаційної системи у середньому на 23%.

6. Синтезовано апріорну модель найбільш реальних зовнішніх умов функціонування бортових радіолокаційних систем, котра, на відміну від існуючих, враховує взаємозв'язок статистичних параметрів передавальних характеристик каналу зв'язку з фізичними параметрами іоносфери та частотними параметрами радіосигналів.

7. Розроблено та введено в теорію і практику адаптивний метод компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях, котрий вимагає значно менший обсяг апріорної інформації про параметри радіопристроїв та значною мірою підвищує показники якості бортових радіолокаційних систем. Очікуваний вииграш за величиною відносного імовірного показника якості бортових радіолокаційних систем становить (0,06-0,26) за відсутності завад (0,61-0,69) в умовах радіоелектронної протидії.

8. Розроблені та науково обґрунтовані практичні рекомендації, спрямовані на підвищення показників якості функціонування бортових радіолокаційних систем та виконано експериментальну перевірку можливостей практичної реалізації і працездатності адаптивної компенсації нелінійних спотворень, а також принципів результатів і висновків теоретичного аналізу точності та динамічних характеристик радіосигналів.

9. Практична значимість виконаних досліджень полягає в тому, що отримані результати досліджень дозволяють вирішити ряд практично важливих задач, зокрема:

- забезпечувати достатньо гнучкий запас за завадостійкістю бортових радіолокаційних систем до (8-10)%, що враховує перспективи розвитку засобів радіоелектронної протидії на передбачуваний період експлуатації даних телекомунікаційних систем;

- підвищити на (5-7)% точність визначення динамічного діапазону багатокаскадних радіопристроїв із довільними частотно-залежними амплітудними характеристиками каскадів і знаходити оптимальні науково обґрунтовані вимоги до їх параметрів на основі отриманих математичних

моделей;

- визначати оптимальні значення параметрів і способи підключення пристроїв, призначених для пригнічення нелінійних спотворень у радіопристроях;

- проектувати адаптивні компенсатори нелінійних спотворень для розширення лінійного динамічного діапазону радіопристроїв із урахуванням специфіки функціонування телекомунікаційних систем.

10. Основні висновки і рекомендації дисертаційної роботи доведені теоретично, при цьому відзначається достатнє узгодження теоретичних і експериментальних результатів, котрі не суперечать відомим положенням теорії і практики РЛС.

Достовірність наукових і практичних результатів підтверджується експериментальними дослідженнями. Основні результати, отримані в даній роботі, впроваджені.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Міжнародні публікації або у збірниках, що входять до міжнародних наукометричних баз

1. Шефер О. В. Сучасний метод ідентифікації нелінійних сигналів радіотехнічних систем / О. В. Шефер // Науково-технічний журнал «Системи озброєння і військова техніка». Харків: ХНУПС, 2017. – №1 (49). – С.185-189.

2. Шефер О. В. Використання сигнальної і параметричної ідентифікації для підвищення керованості радіонавігаційних систем / О. В. Шефер // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. К.: Нац. ун-т оборони України. – 2017. – № 1(28). – С. 63-66.

3. Шефер О. В. Принципи формування імпульсного плазмового середовища для підвищення завадостійкості радіосигналів / О. В. Шефер // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: НАУ «ХАИ», 2017. – Вып. 2 (137). – С. 36-43.

4. Shefer O. V. Optimization of satellite telecommunication systems due to the space craft orbit injection / O. V. Shefer // The Scientific Journal “Electronics and control systems”. Kyiv: NAU, 2017.– №. 1 (51). – P. 21-28.

5. Шефер О. В. Формування завадостійкого каналу зв'язку із космічним апаратом шляхом зниження щільності плазми ударної хвилі / О. В. Шефер // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. Харків: ХНУПС, 2017. – №. 2 (27). – С.131-134.

6. Шефер О. В. Спосіб вимірювання параметрів плазми з метою підвищення завадостійкості супутникових телекомунікацій/ О. В. Шефер // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2017. – №3 (249). – С. 155-160.

7. Шефер О. В. Оптимізація іонно-електронних процесів приладів радіотехнічного забезпечення, як запорука якісної телеметрії з літальним

апаратом / О. В. Шефер // Системи обробки інформації. – Харків: ХНУПС, 2017.– №4 (150). – С. 31-38.

8. Шефер О. В. Уточнення рівняння моментів обертових електричних машин пристроїв навігації / О. В. Шефер, Д. М. Нелюба // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КНУ, 2017. – Вип. 3(104). – С. 27-32.

9. Шефер О. В. Основні результати експериментальних досліджень напруженості електричного поля і протяжності плазми для радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій / О. В. Шефер // Збірник наукових праць харківського національного університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – Харків: ХНУПС, 2017. – №. 4 (53). – С.134-143.

10. Шефер О. В. Оптимальні умови утворення низькотемпературної плазми для зменшення щільності стохастичного іонізованого середовища навколо космічного апарата / О.В. Шефер // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – Вип. 5 (45). – С.158-161.

11. Shefer O. V. Probe studies of localized plasma, as a method of increasing the interference of satellite radionavigational systems on the area of sc's orbit injection / O. V. Shefer // Control, Navigation and Communication Systems. – Poltava: PoltNTU, 2017. – no. 6 (46). – pp. 9-14.

Статті у наукових фахових виданнях рекомендованих МОН України

12. Шефер О. В. Сигнальна і параметрична ідентифікація / А. М. Сільвестров, В. М. Галай, О. В. Шефер // Системи управління навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – вип. 1 (25). – С. 135-137.

13. Шефер О. В. Урахування пружних деформацій у процесі керування складними технічними системами / О. В. Шефер, В. М. Галай // Системи управління навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 2 (26). – С. 48-54.

14. Shefer Oleksandr. Algorithm of identification of nonlinear technical systems according to measured data / O. Shefer, V. Galai // Control, Navigation and Communication Systems. – Poltava: Polt NTU, 2014. – no. 3 (31). – P. 91-95.

15. Шефер О. В. Синтез оптимального алгоритму обробки сигналів неконтрольованого випромінювання для ідентифікації об'єктів / О. В. Шульга, О. В. Шефер // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип. 4 (40). – С.11-13.

16. Шефер О. В. Сучасний підхід до механізму елементарних процесів тліючого розряду функціональних елементів радіотехнічних пристроїв / О. В. Шефер // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2017.– №1(54). – С.67-72.

17. Шефер О. В. Геометричний чинник та його вплив на похибку визначення навігаційних параметрів у псевдосупутниковій радіосистемі / О. В. Шульга, О. В. Шефер // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – Вип. 1 (41). – С. 75-77.

18. Шефер О. В. Аналіз закономірностей зміни властивостей електричного розряду, як запорука покращення якості функціонування радіонавігаційних систем / О. В. Шефер // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. Вип. 2– (42). – С.13-16.

19. Шефер О. В. Підвищення завадостійкості радіотехнічних систем шляхом адаптивного переналагодження та інверсного кореляційного підходу до виявлення корисного сигналу / О. В. Шефер // Наукові записки УНДІЗ. – К.: ДУТ, 2017. – №1(45). – С. 82-88.

20. Шефер О. В. Інтегральний спосіб підвищення завадостійкості передачі інформації у системі організації зв'язку із космічним апаратом / О. В. Шефер // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2017. – Вип. 2. – С. 3-5.

21. Шефер О. В. Використання каналів втрати енергії електронів плазмової оболонки для мінімізації спотворень та затухань сигналів зв'язку із космічним апаратом / О. В. Шефер // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – Вип. 3 (43). – С.139-142.

22. Шефер О. В. Проблема формування геометрії плазмового середовища імпульсних засобів телекомунікацій / О. В. Шефер // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2017. – №2(55). – С.69-75.

23. Шефер О. В. Концепція підвищення надійності радіотехнічних пристроїв шляхом експериментальних досліджень запалювання та розвитку розряду у плазмових пальниках / О. В. Шульга, О. В. Шефер, Д. М. Нелюба, М. М. Гонтар // Наукові записки УНДІЗ. – К.: ДУТ, 2017. – №2(46). – С. 65-73.

24. Shefer O. V. The prospects and peculiarities of plasma with hollow cathode using for satellite telecommunications noise stability increase / O. V. Shefer // Озброєння та військова техніка: наук.-техн. журн. – К.: Центр. НДІ озброєння та військ. техніки ЗСУ, 2017. – № 2 (14). – С. 62-65.

25. Шефер О. В. Дослідження впливу обмеженості динамічного діапазону радіоприймальних пристроїв на показники якості бортових радіосистем / О. В. Шефер, Є. В. Гаврилко // Наукові записки УНДІЗ. – К.: ДУТ, 2017. – №4(48). – С. 18-23.

26. Шефер О. В. Підвищення надійності старту плазмового пальника для подальшого керування виходом у робочий режим пристроїв супутникового радіозв'язку космічних апаратів / О. В. Шульга, О. В. Шефер // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2017.– Вип. 4 (44). – С. 164-169.

27. Шефер О. В. Дослідження особливостей роботи джерел випромінювання плазми у різних режимах для підвищення перешкодозахищеності КА / О. В. Шульга, О. В. Шефер, Д. М. Нелюба, М. М. Гонтар // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2017. – Вип. 3. – С. 12-14.

28. Шефер О. В. Удосконалення показників якості бортових радіолокаційних систем у реальних умовах їх застосування / С. В. Козелков, О. В. Шефер, О. В. Шульга // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: ДУТ, 2017. – №4(57). – С.23-29.

29. Шефер О. В. Методика визначення фазових шумів радіопристроїв та оцінка їх впливу на показники якості бортових радіолокаційних систем /

С. В. Козелков, О. В. Шефер, О. В. Шульга // Зв'язок. – К.: ДУТ, 2017. – Вип. 6. – С. 12-16.

Тези та матеріали конференцій

30. Шефер О. В. Алгоритм визначення ядер Вольтерра зведеного нелінійного аналітичного оператора із застосуванням методу нелінійних вхідних сигналів / О. В. Шефер // Збірник тез за матеріалами V міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». Полтава 3 – 4 грудня 2014. – Полтава: ПолтНТУ. – С. 7-10.

31. Шефер О. В. Визначення залежності показників якості від ширини лінійного динамічного діапазону типового радіоприймального пристрою / О. В. Шефер, Р. В. Мякушко // Тези 67-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 1. (Полтава, 2 квітня – 22 травня 2015 р.) – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – С. 11-13.

32. Шефер О. В. Проблема фільтрації сигналів та аналітичне градування датчиків мехатронних систем / О. В. Шефер, В. Д. Дзівіцький // Тези 68-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 1. (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – С. 27-29.

33. Shefer Oleksandr. Problem of creation noise immunity systems telematic by integrating moving objects and the environment properties / O. Shefer. // Synergetics, mechatronics, telematics road machines and systems in educational process and science. Research Papers Collection on International Scientific Conference Materials. – Ukraine, Kharkov, KhNAHU. – March, 16, 2017 – pp. 7-9.

34. Шефер О. В. Сучасні аспекти побудови заводостійкого зв'язку під час взаємодії радіохвиль із іонізованим середовищем / О. В. Шефер // Збірник наукових праць за результатами всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв». – Індустріальний інститут ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 11-12 квітня 2017 р. – С. 272-275.

35. Шефер О. В. Нові властивості плазми для ефективного використання сегменту супутникових телекомунікацій / О. В. Шефер // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». ДУТ. – Київ, 12 квітня 2017 р. – С. 183.

36. Шефер О. В. Шляхи побудови надійного телеметричного зв'язку при проходженні радіохвиль через плазму / О. В. Шефер // Збірник матеріалів XI Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій». НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – Київ, 18-21 квітня 2017 р. – С. 223-225.

37. Shefer Oleksandr. The analyses of plasma's influence factors on the satellite telecommunications noise immune / O. Shefer. // Proceeding of the XIII International Scientific-Technical Conference "AVIA-2017". – Ukraine, Kyiv, NAU. – 19-21 of April, 2017 – pp. 12.19-12.24.

38. Шефер О. В. Науково-методичний апарат для оцінювання можливостей підвищення завадостійкості супутникових телекомунікацій / О. В. Шефер // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції „Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства”. КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 20-21 квітня 2017 р. – С. 73.

39. Шефер О. В. Новітній підхід щодо забезпечення надійної телеметрії під час проходженні електромагнітних хвиль через плазму / О. В. Шефер // Тези 69-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 1. (Полтава, 19 квітня – 19 травня 2017 р.) – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – С. 23-24.

40. Shefer Oleksandr. Characteristics of plasma environment according to the discharge gap parameters / O. Shefer. // Problems of modern power engineering and automation in the system nature management (theory, practice, history, education). Proceeding of the VI International Scientific-Technical Conference. – Ukraine, Kyiv, NULES. – 15-19 of May, 2017 – pp. 64-66.

41. Шефер О. В. Спосіб покращення електромагнітної сумісності зв'язку з рухомим об'єктом, котрий проходить через плазму іоносфери / О. В. Шефер // Проблемы электромагнитной совместимости перспективных беспроводных сетей связи (ЭМС-2017): Сборник научных трудов третьей международной научно-технической конференции, Харьков 23-24 мая 2017. – Харьков: ХНУРЕ, 2017. – С. 55-57.

42. Шефер О. В. Про можливість часткового просвітлення плазми навколо космічного апарату для покращення якості функціонування наземних та супутникових телекомунікацій / О. В. Шефер // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8-9 червня 2017 року: збірник тез доповідей – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. – С. 97-99.

43. Shefer O. V. Innovations is the noise immune channel direction with the spacecraft formation / O. V. Shefer. // Mechatronic systems: of innovation and engineering (MSIE-2017). Proceedings of the International Scientific-Practical Conference. – Ukraine, Kyiv, KNUITD. – June, 15, 2017. – pp. 119-120.

44. Shefer Oleksandr. Scientifically-technical solutions that are connected with the increase of satellite telecommunications signals' noise immunity during sc's sea start / O. Shefer. //Modern power plants in transport and technologies and maintenance equipment (MPPTTME-2017). Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. – Ukraine, Kherson, KhSMA. – September, 28-29, 2017 – pp. 177-178.

45. Shefer O. Increasing of satellite telecommunication systems exploitation noise immunity on the area of space craft's near-earth orbit injection / O. Shefer. // Proceeding of the V International Scientific-Technical Conference «Problems of informatization». Cherkasy – Baku – Bielsko-Biala – Poltava – Ukraine, Cherkasy, CherkSTU. – November, 13-15, 2017 – pp. 19-20.

46. Шефер О. В. Інноваційний метод забезпечення зв'язку із високошвидкісними рухомими об'єктами / О. В. Шефер // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Управління

високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем» 23-24 листопада 2017 року, Кропивницький. – КЛА НАУ, 2017. – С. 68-70.

47. Шефер О. В. Аналіз показників якості бортових радіолокаційних систем для дистанційного дослідження об'єктів / О. В. Шефер // Тези III Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» Полтава, ПолтНТУ. – 4 грудня 2017. – С. 106-107.

48. Шефер О. В. Розроблення методики представлення та дослідження складних нелінійних радіопристроїв високого порядку за допомогою модифікованих структурних матриць систем / О. В. Шефер // Збірник наукових праць за матеріалами X Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки», 6-8 грудня 2017 року – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – С. 287-293.

49. Шефер О. В. Підвищення пропускну здатності радіоприймальних пристроїв, шляхом удосконалення математичного апарату для аналізу нелінійностей, на основі рядів Вольтерра / О. В. Шефер // Тези доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». ДУТ. – Київ, 12 грудня 2017 р. – С. 81.

50. Шефер О. В. Метод підвищення перешкодостійкості радіосигналів із урахуванням нелінійних інерційних процесів / О. В. Шефер // Тези доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». ДУТ. – Київ, 13 грудня 2017 р. – С. 81-82.

51. Shefer O. V. Investigation of nonlinear processes in radio devices as a guarantee of increase the quality functioning for radiolocation systems / O. V. Shefer, V. P. Dorohobid // Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: International Research and Practice - Conference. – Republic of Poland, Radom, RAЕ. – December, 27-28, 2017. – pp. 48-52.

АНОТАЦІЯ

Шефер О.В. Моделі та методи підвищення якості функціонування бортових радіолокаційних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2018.

Робота присвячена вирішенню проблеми підвищення якості функціонування бортових радіолокаційних систем (БРЛС). Набула подальшого розвитку теорія системного аналізу впливу нелінійних процесів у багатокаскадних радіоприймальних пристроях (РПП), що дозволило провести оцінку показників якості БРЛС в умовах радіоелектронної протидії. Розроблено метод функціональної залежності показників якості БРЛС від ширини лінійного динамічного діапазону РПП даних систем.

Удосконалена модель урахування впливу частотно-селективних властивостей каналу розповсюдження радіохвиль на завадостійкість РПП. Запропоновано новітній енергоефективний метод локального зниження щільності іоносферної плазми для підвищення показників якості функціонування БРЛС.

Розроблені рекурентні алгоритми та методика знаходження ядер Вольтерра складних багатомірних радіотехнічних систем високого порядку й обернених нелінійних аналітичних операторів. Розроблено удосконалений адаптивний метод компенсації нелінійних спотворень у радіопристроях.

Застосування розроблених нелінійних адаптивних компенсаторів дозволяє отримати необхідні значення параметрів і способи підключення радіопристроїв призначених для пригнічення нелінійних спотворень в РПП БРЛС.

Ключові слова: бортова радіолокаційна система, динамічний діапазон, радіолокаційний сигнал, засоби телекомунікацій, нелінійна адаптивна компенсація, завадостійкість, смуга пропускання, нелінійна передавальна функція, радіоелектронна протидія.

АННОТАЦІЯ

Шефер А. В. Модели и методы повышения качества функционирования бортовых радиолокационных систем. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков, 2018.

Работа посвящена решению проблемы повышения качества функционирования бортовых радиолокационных систем (БРЛС). Получила дальнейшее развитие теория системного анализа влияния нелинейных процессов в многокаскадных радиоприемных устройствах (РПУ), что позволило провести оценку показателей качества БРЛС в условиях радиоэлектронного противодействия. Разработан метод функциональной зависимости показателей качества БРЛС от ширины линейного динамического диапазона РПУ данных систем.

Усовершенствована модель учета влияния частотно-селективных свойств канала распространения радиоволн на помехоустойчивость РПУ. Предложен новейший энергоэффективный метод локального снижения плотности ионосферной плазмы для повышения показателей качества функционирования БРЛС.

Разработаны рекуррентные алгоритмы и методика нахождения ядер Вольтерра сложных многомерных радиотехнических систем высокого порядка и обратных нелинейных аналитических операторов. Разработан усовершенствованный адаптивный метод компенсации нелинейных искажений в радиоустройствах.

Применение разработанных нелинейных адаптивных компенсаторов

позволяет получить необходимые значения параметров и способы подключения радиоустройств, предназначенных для подавления нелинейных искажений в РПУ БРЛС.

Ключевые слова: бортовая радиолокационная система, динамический диапазон, радиолокационный сигнал, средства телекоммуникаций, нелинейная адаптивная компенсация, помехоустойчивость, полоса пропускания, нелинейная передаточная функция, радиоэлектронное противодействие.

ABSTRACT

Shefer O. V. Models and methods of increasing the quality of functioning of onboard radio local systems. – Qualified research results on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2018.

For the first time an analytical method was proposed for the determination of scientifically-grounded requirements for frequently dependent parameters both in general and individual cascades, taking into account the statistical and spectral characteristics of radar signals and obstacles that allows to determine the major requirements to the dynamic diapason of cascades.

A proposed method of the influence of non-linear processes in the radio receiving devices with multi-cascades at the expense of an adequate description of radio receiving devices of high order with the maximum full consideration of their linear and dynamic properties that allowed carrying out the evaluation of indicators of quality of onboard radio local systems in conditions of their radio electronic counteraction.

A method of functional dependence of indicators of quality of onboard radio local systems from the width of the linear dynamic diapason of radio receiving devices that unlike existing ones considers the most possible conditions of their practical utilization and allows creating an adequate model of non-linear processes was further developed.

A method of local reduction of density of ionospheric plasma for the maintenance of reliability of connection and increasing of noise immunity of functioning of radio receiving devices of onboard radio local systems that differs from well-known methods in high energy sufficiency.

A model of taking into consideration the influence of frequently-selective properties of transionospheric propagation of radio waves on the noise immunity of radio local devices, which, unlike existing ones, makes it possible to consider the connection of statistic parameters of transmitting characteristics of channel of communication with physical parameters of ionosphere and frequent parameters of radio signals of onboard radio local systems was developed.

An adaptive method of compensating nonlinear distortions in radio devices on the basis of utilization the synthesized non-linear adaptive compensators for expansion of linear dynamic diapason of radio receiving devices that differs from

well-known ones in the fact that it cannot lead to the reduction of reliability of onboard radio local systems both in hardware and functional sense was greatly developed. It helped to increase the quality of functioning of onboard radio local systems.

The utilization of developed adaptive method of compensation of non-linear distortions in radio devices allows increasing the quality of functioning of onboard radio local systems in conditions of radio local counteraction in (1,82-2,03) times, in comparison with existing methods that provides the certainty and quality of reception and treatment of the radio signals in real conditions.

Developed recursive algorithms and methodic of finding Voltaire corns of complex multi-dimensional high-order radio technical systems and reversed nonlinear analytic operators have made it possible to increase the accuracy of evaluation of real quality indicators of onboard radio local systems in (5-7)% in the given conditions of their functioning.

Developed scientifically methodical apparatus considers the influence of properties of transionospheric highway and provides the compensation of negative factors (absorption, reflection, and dispersion of radio signal) and allows increasing noise immunity of functioning of radio accomodation of the carrier of onboard radio local system on the average in 23%.

Developed method of systematic analysis of the influence of non-linear processes in multi-cascade radio reciving devices of onboard radio local systems in conditions of radio electronic counteraction allows determining the optimal meanings of parameters and the ways of connecting the devices that were created to oppress the non-linear distirrtions in radio receiving devices. In addition, they were designed to project non-linear adaptive compensators for the expansion of their linear dynamic diapason taking into consideration the specifics of functioning of onboard radio local systems.

The use of developed methodology allows providing the margin for noise immunity of onboard radio local systems up to (8-10) %, taking into account some possible prospects for the development of electronic counteraction for the estimated period of expluataction of the mentioned telecommunication systems. An expected gain in the magnitude of relative probability of the quality of onboard radio local systems developed by scientifically-substantiated recommendations is (0,06-0,26) during the absence of interference (0,61-0,69) in the conditions of radio electronic counteraction (in comparison with the onboard radio local systems with the typical radio receiving device, the width of the linear range does not exceed (40-50) dB.

The use of nonlinear adaptive compensators allows obtaining the necessary values of parameters and methods of connecting radio devices that are designed to suppress nonlinear distortions in radio receiving devices, which allows increasing the reliability of functioning of onboard radio local systems up to (6-12) %.

Key words: onboard radio local system, dynamic diapason, radio local signal, means of telecommunication, non-linear adaptive compensation, noise immunity, bandwidth, non-linear transmitting function, radio electronic counteraction.

ШЕФЕР ОЛЕКСАНДР ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.396.669

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ БОРТОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Поліграфічний центр
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
36011, Полтава, просп. Першотравневий, 24.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції,
серія ДК, №3130 від 06.03.2008 року.

Папір офсетний. Друк RISO.
Ум. друк. арк. 1,67. Наклад 100 прим.
Формат 60 x 90/16. Зам. № 80 від «02» липня 2018 р.