

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
Київський інститут інженерів цивільної авіації

На правах рукопису
УДК 621.396: 519.2

БОЙКО Іван Федорович

МЕТОДИ СТОХАСТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМ ОБРОБКИ
ІНФОРМАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ОРТОГОНАЛЬНИХ
ФУНКЦІОНАЛІВ ВІД БЕЗМЕЖНО ПОДІЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

05.13.14 - системи обробки інформації і управління

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КІІВ 1993

ДВ 28.546

Робота виконана в Київському інституті інженерів цивільної авіації

ЛІНБ України ім.В.Стефаніка



00810540 (1)

Наукові консультанти:

- доктор фізико-математичних наук, професор В. Г. Марченко,
- доктор технічних наук, професор М. О. Шутко

Офіційні споненти:

- доктор технічних наук, професор І. М. ПРЭСНЯКОВ,
- доктор технічних наук, професор А. Г. ШЕВЕЛЬОВ,
- доктор технічних наук, професор Л. М. ШЕРБАК.

Провідна установа - науково-дослідний інститут "БУРАН".

Захист дисертації відбудеться " 26 " грудня 1993 р. о " 15 " години на засіданні спеціалізованої ради Д 01.35.01 при Київському інституті інженерів цивільної авіації за адресою: 252601, м. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту.

Автореферат розіслано " 26 " листопада 1993 року.

Вчений секретар спеціалізованої ради
К. Т. Н., доцент

Р. О. ШЕВЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Широке впровадження в практику різних систем обробки інформації і управління, високі вимоги, які пред'являються до ефективності їх функціонування в реальних умовах, передбачають глибокий і всебічний аналіз їх роботи в умовах впливу реальних випадкових сигналів і перешкод. Найбільшу складність у цьому плані являють собою нелінійні системи і пристрої. І особливо інерційні нелінійні системи при впливі нестационарних випадкових процесів. Як відзначається в ряді літературних джерел по статистичній радіофізиці і радіотехніці, навіть в рамках кореляційної теорії тут виникають серйозні ускладнення при застосуванні традиційних методів аналізу з використанням функцій розподілу вхідних впливів.

Складність вказаних вище проблем породила велику різноманітність різних частинних методів аналізу нелінійних систем і пристроїв, що дозволяють, як правило, розв'язувати застосовні задачі з використанням гауссової стаціонарної моделі вхідних впливів. В зв'язку з цим актуальною є проблема розробки загальних аналітичних методів аналізу нелінійних систем з використанням, у загальному випадку, негауссових і нестационарних моделей. В цьому плані найбільш плідним є підхід з використанням функціональних рядів і, зокрема, стохастичних ортогональних розкладань. При цьому в якості вхідних впливів доцільно використовувати так звані безмежно подільні випадкові процеси і сигнали і, зокрема, лінійні випадкові процеси. Для останніх характерна конструктивність їх завдання і, крім того, на їх основі легко здійснити описування широкого класу негауссових випадкових процесів і явищ, що виникають в різних системах і пристроях обробки інформації.

Розвиток вказаних вище підходів до аналізу нелінійних систем до останнього часу стримувався складністю проблеми побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів в явному вигляді, що дозволяють успішно використовувати їх при розв'язанні конкретних застосовних задач як аналізу, так і синтезу систем обробки інформації.

Таким чином, актуальність досліджень в напрямку розробки методів аналізу і синтезу систем обробки інформації з використанням стохастичних ортогональних розкладань на основі безмежно подільних процесів обумовлена потребами як теорії, так і практики систем обробки інформації і управління, зв'язаними з підвищенням ефективності їх роботи в умовах впливу негауссових і нестационарних випадкових сигналів і перешкод.

Огляд стану проблеми. Одними із перших робіт по використанню стохастичних ортогональних розкладань для рішення нелінійних задач в теорії і практиці перетворень випадкових процесів були праці Н. Вінсера, підсумком яких є відома його монографія, що вийшла в російському перекладі в 1961 році. В цій роботі він побудував ортогональну систему стохастичних функціоналів від вінеровського процесу і використав її для рішення деяких задач, зв'язаних з нелінійними перетвореннями випадкових процесів. Після цього вказаною проблемою займалися Р. Камерон і В. Мартін, Р. Дейч, Х. Огура, К. Іто, Т. Кайлатц, А. Сегалл, В. С. Пугачов, С. Я. Раєвський, В. І. Тихонов, Р. Р. Левін, Б. Р. Марченкс, В. А. Омельченко. В більшості робіт вказаних авторів побудова ортогональних систем стохастичних функціоналів зв'язана з гауссовою мірою. Крім цього, як правило, побудова закінчується теоретичним рівнем розгляду, ортогональні функціонали не виписуються в явному вигляді, що, природно, не дозволяє використовувати їх для конкретних інженерних обчислень.

Характеризований стан досліджень з побудови і використання ортогональних систем стохастичних функціоналів в теорії і практиці систем обробки інформації дозволяє виділити такі основні напрямки теоретичних і застосовних досліджень: вибір і обґрунтування конструктивної моделі випадкових процесів, що дозволяє задавати в явному вигляді послідовність лінійно незалежних однорідних стохастичних функціоналів у відповідним гільбертовім просторі; дослідження властивостей і розробка методів і алгоритмів обчислення скалярного добутку однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами; дослідження і розробка методів побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів в явному вигляді; розробка методів описування нелінійних перетворень безмежно подільних процесів в термінах однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами; рішення задач практичного застосування ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами для аналізу нелінійних систем обробки інформації як у широкому, так і в стро-

гому значенні, для рішення проблем розпізнавання негауссових процесів з метою розробки принципів і методів діагностики і ідентифікації нелінійних систем і пристроїв, оцінювання точності їх роботи й прогнозу стану в умовах впливу реальних випадкових сигналів і перешкод.

Всі ці дослідження спрямовані на одержання більш вірогідних результатів при дослідженні і розробці перешкодостійких інформаційних систем шляхом використання більш адекватних реальним випадковим процесам і сигналам моделей, застосування точних аналітичних методів розрахунків, що дозволяють контролювати результати математичного і фізичного моделювання. Всебічний аналіз наведених напрямків дозволяє виділити проблему розробки методів аналізу нелінійних систем обробки інформації і розпізнавання випадкових сигналів на основі безмежно подільних процесів з використанням стохастичних ортогональних мір і функціоналів.

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є розробка методу стохастичних ортогональних розкладань на основі безмежно подільних випадкових процесів і його застосування до задач стохастичного аналізу динаміки нелінійних пристроїв систем обробки інформації і управління при впливі негауссових і нестационарних випадкових сигналів і до розробки методів розпізнавання і знаходження сигналів в узагальнених спектрах.

Основною задачею досліджень є розробка методів побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів і розробка алгоритмів їх практичного застосування при ортогональних розкладаннях випадкових процесів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: 1) дослідити властивості класу безмежно подільних випадкових процесів в термінах характеристичних функцій і, зокрема, їх основних представників: однорідних процесів з незалежними приростами, заданих на всій числовій осі, і лінійних випадкових процесів; 2) розробити методи конструктивного зображення моделей безмежно подільних процесів; 3) дослідити способи описування реальних випадкових процесів і явищ на основі математичних моделей безмежно подільних випадкових процесів; 4) дослідити властивості однорідних поліноміальних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами і узагальнити їх на однорідні стохастичні функціонали; 5) розробити методи побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами і, зокрема, метод з використанням індикаторного числення. Дослідити властивості

побудованих ортогональних систем; 6) на основі побудованої ортогональної системи розробити метод стохастичних ортогональних розкладань, спорядивши його відповідними алгоритмами, що забезпечують його використання у застосуваннях; 7) здійснити характеризацію основних класів нелінійних перетворень випадкових сигналів, що використовуються в системах обробки інформації і управління, в значенні застосовності до них методу стохастичних ортогональних розкладів; 8) здійснити аналіз в рамках спектрально-корреляційної теорії методом стохастичних ортогональних розкладань деяких конкретних типових для систем обробки інформації і управління нелінійних пристроїв (модулятор, обмежувач, квадратор, обмежувач з фільтром) при впливі негауссових і нестационарних процесів; 9) розробити принципи обчислення моментних функцій вище другого порядку і характеристичних функцій відгуків нелінійних пристроїв при впливі лінійних випадкових процесів; 10) дослідити властивості спектральних мір лінійних випадкових процесів і на їх основі розробити методи їх розпізнавання; 11) розробити методи розпізнавання гільбертових випадкових сигналів в використанні стохастичних ортогональних розкладів; 12) здійснити експериментальну й практичну перевірку основних теоретичних положень виконаних досліджень шляхом впровадження їх у практику аналізу і синтезу систем обробки інформації і управління.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше розроблені методи й принципи визначення ядер лінійних випадкових процесів; розглянуто і теоретично обґрунтовано опис в термінах безмежно подільних випадкових процесів деяких реальних радіофізичних процесів; теоретично обґрунтовано розповсюдження властивостей однорідних поліноміальних стохастичних функціоналів на однорідні стохастичні функціонали від процесів з незалежними приростами з довільним інтегрованим в квадраті ядром; доведено варіант теореми про математичне сподівання однорідного стохастичного функціоналу від процесів з незалежними приростами, зручний для практичних обчислень, і розроблено алгоритм його практичної реалізації. Дана теорема має фундаментальне значення для розв'язування задач побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів і при реалізації методу стохастичних ортогональних розкладань у зв'язку з тим, що вона дозволяє конструктивно задавати в явному вигляді і обчислювати скалярний добуток в гільбертовому просторі однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами; уведена в розгляд індикаторна функція відсутності однакових аргу-

ментів, на основі якої побудована оригінальна ортогональна система стохастичних функціоналів, що узагальнює властивості відомої системи вінеровських функціоналів на випадок будь-якого однорідного процесу з незалежними приростами. Досліджені основні властивості такої ортогональної системи; розроблено метод стохастичних ортогональних розкладань стосовно до побудованої ортогональної системи і використаний для розв'язування задач спектрально-кореляційного аналізу як безінерційних, так і інерційних нелінійних пристроїв і систем при впливі негауссових і нестационарних безмежно подільних випадкових процесів; запропоновано оригінальний метод знаходження моментних функцій вище другого порядку і характеристичних функцій відгуків нелінійних пристроїв на вплив безмежно подільних випадкових процесів; виконано практичний аналіз ряду реальних типових нелінійних пристроїв при впливі у загальному випадку негауссових і нестационарних випадкових процесів; досліджені властивості спектральних мір лінійних випадкових процесів і розроблені методи розпізнавання гільбертових випадкових процесів у спектральній області (у класичному значенні і в значенні узагальнених рядів Фур'є).

Практична цінність роботи полягає в тому, що: запропоновані конструктивні методи опису з використанням методів характеристичних функцій і стохастичного інтегрування класу безмежно подільних випадкових процесів, що надає можливість в досить зручній для застосувань формі описувати широкі класи імпульсних і флуктуаційних реальних процесів і явищ з урахуванням фізики їх утворення і досліджувати їх імовірнісні характеристик без використання традиційного апарату імовірнісних розподілів; запропонована методика побудови систем ортогональних стохастичних функціоналів відзначається простотою і зручністю застосування їх на практиці; створена методика спектрально-кореляційного аналізу з використанням стохастичних ортогональних розкладань дозволяє значно розширити клас нелінійних пристроїв, включаючи інерційні, які можна аналізувати при впливі у загальному випадку нестационарних безмежно подільних випадкових процесів (методика упроваджена в практику); згадана вище методика дозволяє також знаходити на практиці для нелінійних пристроїв зв'язок між першими двома моментами відгуків і впливу, здійснювати порівняння наслідків впливу процесів з різними видами безмежно подільних розподілів; розроблена методика знаходження вищих моментів і характеристичних функцій відгуків нелінійних пристроїв при впливі нестационарних і негауссових про-

цесів і забезпечена відповідним алгоритмом для практичної реалізації на основі ЕОМ; впроваджено в практику метод аналізу точності нелінійних пристроїв в рамках енергетичної теорії при впливі різних перешкод і шумів з безмежно подільними розподілами; запропоновані методи розпізнавання як стаціонарних, так і нестаціонарних процесів в регулярному й сингулярному випадках з використанням стохастичних ортогональних мір і функціоналів, що допускають їх практичну реалізацію на основі сучасних ЕОМ при розв'язуванні застосовних задач діагностики й прогнозу стану систем обробки інформації.

Обґрунтованість та вірогідність основних результатів є наслідком чіткого математичного опису процесу побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів, методу стохастичних ортогональних розкладів та його застосування при аналізі нелінійних систем та при розпізнаванні випадкових сигналів. Основні положення і висновки сформульовані і доведені у вигляді відповідних теорем і лем. Окрім того, результати конкретних обчислень співпадають з результатами відомих теоретичних положень, підтверджені результатами відповідних експериментів, а також збігом результатів в часткових випадках, що були одержані авторами іншими методами.

Автор захищає: 1) методи і результати опису реальних радіофізичних процесів і явищ на основі моделей безмежно подільних процесів; 2) доведені теореми, їх наслідки і леми і, зокрема, теорему про математичне сподівання однорідних стохастичних функціоналів і її наслідки і розроблений на їх основі алгоритм обчислення скалярного добутку стохастичних функціоналів; 3) методи побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами; 4) побудовані ортогональні системи і результати дослідження їх основних властивостей; 5) результати теоретичного обґрунтування методу стохастичних ортогональних розкладів і результати досліджень його застосовності до задач спектрально-кореляційного аналізу нелінійних пристроїв і систем при впливі нестаціонарних безмежно подільних процесів; 6) методи обчислення вищих моментів і характеристичних функцій відгуків нелінійних пристроїв при впливі безмежно подільних процесів; 7) особливості і результати аналізу на основі розроблених теоретичних методів конкретних видів типових нелінійних пристроїв при впливі процесів, породжених вінеровським, пуассонівським і гамма-процесом; 8) результати досліджень спектральних мір лінійних випадкових процесів і методи розпізнавання на їх основі випадкових сиг-

налів; 9) способи розпізнавання випадкових сигналів з використанням методу стохастичних ортогональних розкладань; 10) результати впровадження основних положень роботи.

Впровадження результатів роботи. Основні результати досліджень і розробок впроваджені на підприємствах цивільної авіації і радіопромисловості. Зокрема впроваджені: "Метод анализа инерционных нелинейных систем при воздействии нестационарных и негауссовых процессов на базе стохастических ортогональных разложений"; "Алгоритмы различения и обнаружения случайных сигналов на базе спектральных мер линейных случайных процессов"; "Методика корреляционного анализа нелинейных преобразований в трактах приема и обработки гидроакустических сигналов при наличии помех, описываемых случайными процессами с безгранично делимыми законами распределения"; "Программа и методика летной проверки посадочных радиолокаторов"; "Методики оценки общесистемных характеристик АС УВД"; "Пакет прикладных программ для статистической обработки радиофизических процессов и полей с необходимой документацией, предусмотренной ЕСПД"; "Методика анализа стохастической динамики нелинейных звеньев РЭС с использованием модели линейных случайных процессов". Деякі положення роботи реалізуються в навчальному процесі КІІЦА шляхом залучення студентів до співробітництва в СНТ. Результати досліджень впроваджено з відповідними економічними, інформаційними та соціальними ефектами.

Зв'язок теми досліджень з планами основних ВДР МДА, КІІЦА, ІЕД АН України. Теоретичні і експериментальні дослідження, що складають основний зміст роботи, виконувались в рамках планів науково-дослідних робіт МДА і КІІЦА, а також в рамках договорів про науково технічне співробітництво між КІІЦА і КЕ "Шторм", Інститутом електродинаміки АН України, НДІАС на протязі 1977 - 1993 рр. Зокрема, результати автора були використані при виконанні наступних НДР: "Исследование и разработка методологических основ и принципов проведения комплексных испытаний АС УВД" (Дер. реєстр. N 75054532); "Анализ влияния внедрения новых технических средств, методов испытаний и эксплуатации на эффективность АС УВД" (Дер. реєстр. N 80052804); "Разработка методик оценки общесистемных характеристик АС УВД и оценка эффективности их применения в конкретных районах УВД" (Дер. реєстр. N 0183.0039613); "Исследование линейных случайных процессов как моделей реальных радиофизических сигналов и шумов и их приложения к задачам анализа систем обработки сигналов" (Договір про НТС Р19-С-87); "Исследование прохождения

радисигналов в складних умовах входження летательних апаратів в щільні шари атмосфери і розробка математичного забезпечення для обробки натурних (експериментальних) даних" (Договір про НТС 86-12); "Розробка методів підвищення достовірності обробки вимірної інформації і контролю параметрів радіоелектронних систем" (Дер. реєстр. N VA01001544P).

Апробація роботи. Основні положення та результати досліджень доповідались і одержали позитивну оцінку на 26 міжнародних, всесоюзних та республіканських НТК і семінарах, в тому числі на: РНТК "Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов" (Київ, 1977 - 1983 рр.); VIII Всесоюзної конференції по теорії кодування і передачі інформації (Куйбишев, 1981 р.); VIII і IX в'їздом семінаре секції теорії інформації ЦП НТО РЭС ім. А. С. Попова (Вороніж, 1983 р., Харків, 1985 р.); ВНТК "Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов" (Київ, 1985 р., Львів, 1988 р.); НТС "Статистика случайных полей. Обработка изображений" (Красноярськ, 1988 р.); ВНТК "Методы представления и обработки случайных процессов и полей" (Харків, 1989 р.); Української республіканської школи-семінаре "Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей" (Черкаси, 1991 р.); МНТК "Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов" (Київ, 1992 р.); Міжнародному симпозіумі "Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів" (Тернопіль, 1992 р.); Міжнародній конференції Chan De'92 (Київ, 1992 р.).

Публікації. Основні оригінальні результати є підсумком наукової роботи автора, проведеної на протязі 18 років. Вони складають зміст 58 наукових праць, в тім числі 1 препринт, 2 брошури, 20 статей, 23 тези доповідей і 12 звітів по НДР.

Особистий внесок автора. Подані в дисертації основні результати одержані автором самостійно. В спільних роботах дисертанту належать: ініціатива ідей, формулювання задач, розробка основних положень теорії ортогональних функціоналів та обчислювальних схем методу стохастичних ортогональних розкладань, його застосування в практичних задачах аналізу і синтезу систем обробки інформації.

Структура роботи і її обсяг. Робота складається із вступу, семи розділів, висновків, списку літератури і додатку. Загальний обсяг дисертації 285 сторінок.

У вступі обґрунтовується актуальність теми досліджень, визначаються мета і задачі дисертаційної роботи, сформульовані основні положення, які виносяться на захист, вказана її практична цінність і наукова новизна.

У першому розділі наведені результати аналізу безмежно подільних випадкових процесів як моделей радіофізичних процесів і явищ, які зустрічаються в системах обробки інформації і управління. Сформульовано основні, потрібні в подальших дослідженнях, визначення і властивості безмежно подільних процесів. В роботі розглядаються в основному безмежно подільні процеси у вузькому значенні. Згідно з [29], дійсний або комплекснозначний сепарабельний випадковий процес $\xi(t)$, $t \in T$, заданий на імовірнісному просторі (Ω, \mathcal{F}, P) , де $T \subseteq R^1$ - одновимірна числова множина з підмножиною сепарабельності $T_0 = \{t_j, j = 1, 2, \dots; t_j \in T\}$ називається безмежно подільним у вузькому значенні, якщо всі його скінченномірні розподіли є безмежно подільні.

Під це визначення підпадають лінійні випадкові процеси, які задаються стохастичним інтегралом від детермінованої функції по стохастичній ортогональній мірі, побудованій на приростах однорідного стохастично неперервного процесу з незалежними приростами. В роботі розглядаються гільбертові лінійні випадкові процеси. Саме, гільбертовим лінійним випадковим процесом назовемо процес $\xi(t)$, $t \in T \subseteq R^1$, що припускає зображення у вигляді

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad (1)$$

де $\{\eta(\tau), P[\eta(\tau) = -\eta(-\tau)] = P[\eta(0) = 0] = 1, -\infty < \tau < \infty\}$ дійсний однорідний стохастично неперервний гільбертів випадковий процес з незалежними приростами, який будемо називати породним; $\varphi(\tau, t)$ - дійсна детермінована чисельна вимірна інтегровна в квадраті з вагою $d\rho(\tau) = M|d\eta(\tau)|^2$ по τ при всіх t функція, яку будемо називати ядром зображення.

Фундаментальною властивістю процесів (1) є те, що при відомих трійці параметрів $\{\mu, \sigma \geq 0, L(x)\}$, що задають одновимірну характеристичну функцію породного процесу, і ядрі зображення завжди можна записати їх характеристичну функцію будь-якої вимірності і при цьому вона буде належати до безмежно подільних. Використову-

ючи що властивість, легко одержати досить прості формули для обчислення імовірнісних параметрів процесу (1), таких, наприклад, як моменти початкові і центральні, семіінваріанти і т.п. В роботі наведено основні формули і алгоритми, що дозволяють обчислювати згадані імовірнісні параметри.

Другою, важливою для практичних застосувань, властивістю лінійних випадкових процесів є їх замкненість відносно лінійних перетворень.

Для стаціонарних лінійних випадкових процесів ядро в (1) залежить лише від різниці $(t - \tau)$ часових параметрів.

В другому розділі роботи розкриваються теоретичні і застосовні передумови використання безмежно подільних процесів і, зокрема, лінійних випадкових процесів вигляду (1), а також запропонованого автором методу стохастичних ортогональних розкладань при дослідженні проблемних задач теорії й практики систем обробки інформації і управління.

Перед усім, при розв'язуванні багатьох застосовних і теоретичних задач, зв'язаних з дослідженням і розробкою інформаційних систем, виникають проблеми адекватного опису реальних випадкових процесів і явищ, в умовах впливу яких працюють вказані системи. Окрім цього, такий опис повинен бути досить зручним в значенні простоти як в теоретичному плані, так і при експериментальних дослідженнях на основі моделювання. Цим умовам в значній мірі задовольняють лінійні випадкові процеси вигляду (1), що і показано в роботі. Зокрема, показана добра узгодженість фізики утворення багатьох реальних процесів з указаною моделлю.

Великі проблеми при дослідженні систем обробки інформації виникають у зв'язку зі стохастичним аналізом їх нелінійних пристроїв і, зокрема, інерційних пристроїв в умовах впливу нестационарних і негауссових процесів. Автором у роботах [4, 6, 8, 10 - 12, 14, 15, 16, 17, 29, 43] показана доцільність використання для розв'язування цієї проблеми моделі лінійних випадкових процесів, однорідних стохастичних функціоналів і стохастичних ортогональних розкладань. До того ж, задача аналізу успішно розв'язується як в рамках спектрально-корреляційної теорії, так і в суворому значенні.

В цьому ж розділі роботи запропоновані методи розв'язування на основі стохастичних ортогональних розкладань таких застосовних задач як діагностика систем обробки інформації, оцінювання точності роботи нелінійних систем по вихідному ефекту, ідентифікація і прогноз стану нелінійних систем, розпізнавання випадкових сиг-

налів. Наведені відповідні структурні схеми пристроїв, які розв'язують вказані задачі на основі використання ортогональних стохастичних функціоналів.

Таким чином, практичні задачі дослідження і розробки нелінійних систем обробки інформації і управління є вихідними і лежать в основі теоретичних досліджень і їх розвитку в цій роботі. Ідеологія цього розвитку на основі безмежно подільних процесів і стохастичних ортогональних розкладань, його теоретико-математична суть і практична реалізація складають зміст наступних розділів роботи.

Третій розділ присвячений дослідженню принципів і методів опису реальних радіофізичних процесів і явищ, в умовах впливу яких працюють системи обробки інформації і управління, безмежно подільними процесами. Необхідність розв'язання цих питань обумовлена застосовними проблемами стохастичного аналізу та синтезу систем обробки інформації.

Як показано в першому розділі, безмежно подільний випадковий процес $\xi(t)$, $t \in T$ може бути зображений в кожний момент часу $t \in T$ у вигляді суми нескінченного числа нескінченно малих незалежних доданків. Звідси випливає, що реальні радіофізичні процеси і явища, які можна розглядати в кожний момент часу $t \in T$ як результат дії великої кількості "елементарних" стохастично незалежних випадкових сигналів-імпульсів, добре описуються безмежно подільними процесами. Тут також необхідно відмітити, що фізичне середовище, яке бере участь у формуванні такого процесу, повинно задовольняти принципу суперпозиції.

Виходячи з цих передумов, в роботі розглянута фізика утворення і, на її основі, одержані явні зображення безмежно подільними процесами ряду реальних радіофізичних процесів і явищ. Сюди в першу чергу відносяться дробовий шум, тепловий шум, відбиття зондуючих радіоімпульсів від земної (водної) поверхні, різного роду метеоутворень, турбулентні явища в атмосфері, радіоактивний розпад деяких важких елементів і т.п. Сюди ж відносяться великий клас випадкових імпульсних процесів, тобто таких процесів, у яких окремі "елементарні" випадкові складові імпульси не перетинаються у часі. Якщо ж імпульси з'являються один за одним досить часто, то результати дії окремих "елементарних" імпульсів накладаються і ми приходимо до зображення флуктуаційних процесів безмежно подільними процесами.

В роботі знайдені явні вирази для ядер $\varphi(\tau, t)$ лінійних

зображень імпульсних процесів, при цьому в ролі породних процесів виступають пуассонівський і складний пуассонівський процеси. Знайдені характеристичні функції для дробового шуму і шуму, породженого відбиттями радіолокаційних сигналів від просторових об'єктів. Знайдені також інші імовірнісні характеристики вказаних процесів, а саме математичні сподівання, дисперсії, кореляційні функції, спектральні щільності потужності. Відображена залежність вказаних характеристик від фізичних параметрів описуваних процесів. Наприклад, дисперсія процесу відбиття радіолокаційних імпульсів від просторових об'єктів прямо пропорційна неповному квадрату максимальної й мінімальної відбиттєвої здатності "елементарних" відбивачів об'єкту в випадку рівномірного її розподілу. Всі ці дослідження і їх результати дозволяють використовувати вказані вище моделі при проведенні застосовних досліджень.

Процеси вигляду (1) можна використати також як математичні моделі процесів, що зображають собою відгуки лінійних пристроїв на вплив типу білого шуму $\eta(\tau)$, де $\eta(\tau)$ - процес з незалежними приростами, означений як в (1). При цьому не випадкове ядро $\varphi(\tau, t)$ буде являти собою імпульсну перехідну функцію лінійного пристрою, яка задовольняє відомим умовам фізичної реалізуємості. В роботі розглянуті зображення лінійним випадковим процесом RC- і RLC-шумів, тобто відгуків на виході лінійних RC- і RLC-радіоланцюгів. Для цих процесів у роботі також одержані згадані вище імовірнісні характеристики як у стаціонарнім, так і в нестационарнім випадках.

В цьому ж розділі досліджуються методи аналізу і особливості проходження безмежно подільних процесів через лінійні радіотехнічні ланцюги з постійними й зі змінними у часі параметрами. Ці питання розглядаються тут у зв'язку з тим, що, згідно з властивостями процесів вигляду (1), при дії лінійного випадкового процесу на лінійний пристрій на виході відгук також буде лінійним процесом з тим же породним процесом, що і на вході, а ядро е згорток ядра діючого на вході процесу і імпульсної перехідної характеристики. Отже, одержуємо ще один тип реальних процесів, що добре описується лінійною моделлю (1).

Четвертий розділ є основним у роботі. Він присвячений розробці методів побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами в явному вигляді, що забезпечує можливість їх використання при розв'язуванні застосовних задач аналізу та синтезу при розробці систем обробки

інформації.

Спочатку в четвертому розділі розглядаються властивості однорідних стохастичних функціоналів, тому що вони є тією основною математичною моделлю, що використовується для опису відгуків нелінійних систем на дію безмежно подільних процесів. Окрім того, однорідні стохастичні функціонали відіграють роль вихідних елементів, які підлягають процедурі ортогоналізації при побудові ортонормованих стохастичних базисів. Однорідний поліноміальний стохастичний функціонал n -го порядку визначається, у нашому випадку, наступним виразом:

$$\Phi_n(t) = \sum_{k=1}^N a_k \prod_{j=1}^n \xi_{kj}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) d\eta(\tau_1) \dots d\eta(\tau_n), \quad (2)$$

де $\xi_{kj}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{kj}(\tau, t) d\eta(\tau)$, $k=1, 2, \dots, N$; $j=1, 2, \dots, n$ - елементи прямокутної матриці, до того ж $\varphi_{kj}(\tau, t) \in L_n(-\infty, \infty)$ як функція τ для всіх $t \in T \subseteq R^1$ і для всіх k і j ;

$$K_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) = \sum_{k=1}^N a_k \prod_{j=1}^n \varphi_{kj}(\tau_j, t); \quad (3)$$

$\{a_k, k=1, 2, \dots, N\}$ - деяка послідовність дійсних не випадкових числових сталих.

Фундаментальну властивість таких функціоналів, яка є основою всіх подальших як теоретичних, так і застосованих досліджень, можна сформулювати у вигляді теореми.

Теорема 1. Нехай $\Phi_n(t)$ - однорідний стохастичний поліноміальний функціонал, визначений як у (2), і нехай $\mathcal{X}_n < \infty$, де \mathcal{X}_n - n -й семіінваріант випадкової величини $\eta(t)$. Тоді

$$M\Phi_n(t) = n! \sum_{\sum_{j=1}^n n_j = n} \prod_{j=1}^n \frac{\mathcal{X}_{n_j}^{n_j}}{(n_j!)^{n_j} \cdot n_j!} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K_n^*(\tau_1^{(p_1)}, \tau_2^{(p_2)}, \dots, \tau_{n_1}^{(p_1)}, \tau_{n_1+1}^{(p_2)}, \dots, \tau_{\sum_{j=1}^n n_j}^{(p_n)}; t) d\tau_1 \dots d\tau_{\sum_{j=1}^n n_j}, \quad (4)$$

де сума поширюється на всі можливі різні способи розкладання (розкладання, що відрізняються лише порядком доданків, вважаються оди-

наковими) числа n на суму ν різних додатних цілих доданків ρ_j з кратностями n_j ; $K_n^*(\tau_1, \dots, \tau_n; t)$ - функція, яка одержана із $K_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t)$ шляхом симетризації останньої по перших n аргументах ; $\mathcal{E}_k^{(P)} = (\tau_k, \tau_k, \dots, \tau_k)$.

Теорема 1 дозволяє обчислювати скалярний добуток $(\Phi_n(t), \Phi_m(t)) = M \Phi_n(t) \Phi_m(t)$, необхідний при проведенні ортогоналізації послідовності стохастичних функціоналів $\{\Phi_n(t)\}_{n=0}^{\infty}$ та при обчисленні узагальнених коефіцієнтів Фур'є під час розкладань відгуків нелінійних систем в ортогональні ряди.

В роботі розглянуто процес ортогоналізації, вказаної вище послідовності однорідних поліноміальних стохастичних функціоналів за допомогою відомого методу Грама-Шміда. Одержані загальні вирази для знаходження в явному вигляді елементів ортогональних і ортонормованих систем стохастичних функціоналів, досліджені їх властивості, зокрема, доведена їх повнота в гільбертовому просторі L_2 -функціоналів від лінійних випадкових процесів $\xi(t)$ (1), одержані рекурентні співвідношення.

Явні вирази для перших трьох ортогональних елементів мають вигляд:

$$G_0(t) = 1, \quad G_1(t) = \Phi_1(t) - \alpha_1 \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau, t) d\tau,$$

$$G_2(t) = \Phi_2(t) - (\alpha_2 \int_{-\infty}^{\infty} K_1^2(\tau, t) d\tau)^{-1} \left[(\alpha_3 \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau, t) \times \right.$$

$$\left. \times K_2(\tau, \tau; t) d\tau - 2\alpha_1 \alpha_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau_1, t) K_2(\tau_1, \tau_2; t) d\tau_1 d\tau_2 \right]$$

$$\cdot \Phi_1(t) + (\alpha_1 \alpha_3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau_1, t) K_1(\tau_2, t) K_2(\tau_2, \tau_2; t) d\tau_1 d\tau_2 +$$

$$+ 2\alpha_1^2 \alpha_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_1(\tau_1, t) K_1(\tau_2, t) K_2(\tau_2, \tau_3; t) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3) \Phi_1(t) -$$

$$- \alpha_2 \int_{-\infty}^{\infty} K_2(\tau, \tau; t) d\tau - \alpha_1^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_2(\tau_1, \tau_2; t) d\tau_1 d\tau_2, \dots$$

Елементи одержаної ортогональної системи у загальному випадку не задовольняють умові ортогональності при зсуві їх у часі, тобто не завжди $M[G_n(t)G_m(t+s)] = 0$ для $n \neq m$ і $s \neq 0$. Це утруднює використання їх для розв'язування задач стохастичного аналізу. Їх доцільно використовувати для вирішення проблем розпізнавання сигналів, ідентифікації нелінійних систем.

Для одержання більш простих і зручних для застосувань елементів ортогональних систем стохастичних функціоналів, що задовольняють умові ортогональності при зсувах у часі, в роботі запропоновано принципово новий метод ортогоналізації послідовності однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами. Суть цього методу полягає у простому множенні ядра (3) функціоналу (2) на введenu в розгляд у роботі так звану індикаторну функцію відсутності однакових аргументів, означену співвідношенням:

$$I_n(\tau_1, \dots, \tau_n) = \begin{cases} 1, & \text{якщо всі аргументи різні,} \\ 0, & \text{якщо є однакові аргументи,} \end{cases} \quad (5)$$

$$n = 2, 3, \dots; \quad I_1(\tau) \equiv 1.$$

При цьому одержимо послідовність $\{Q_n(t)\}_{n=0}^{\infty}$, елементи якої мають наступний вигляд

$$Q_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{K}_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) d\eta(\tau_1) \dots d\eta(\tau_n),$$

$$n = 1, 2, \dots; \quad Q_0(t) \equiv 1, \quad (6)$$

$$\text{де } \mathcal{K}_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) = K_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) I_n(\tau_1, \dots, \tau_n). \quad (7)$$

У зв'язку з тим, що ядро (7) уже не є поліноміальним, то в роботі проведено узагальнення властивостей однорідних поліноміальних стохастичних функціоналів (2), і, зокрема, теореми 1 на випадок однорідних стохастичних функціоналів вигляду

$$\tilde{\Phi}_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{K}_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) d\eta(\tau_1) \dots d\eta(\tau_n), \quad (2a)$$

де $\tilde{K}_n(\tau_1, \dots, \tau_n; t) \in L_p^{(m)}(-\infty, \infty)$, $p = 1, 2$ - не випадкова дійсна функція.

Одержана послідовність однорідних стохастичних функціоналів (6) при $\mathcal{P}_1 = 0$ є ортогональною, тобто справедлива

Теорема 2. Нехай $\{Gn(t_1)\}$ і $\{Gn(t_2)\}$, $t_1, t_2 \in T$ - дві послідовності стохастичних функціоналів, елементи яких визначаються згідно з (6). Тоді виконується наступна рівність

$$M[Q_n(t_1)Q_m(t_2)] = \delta_{nm} n! \mathcal{P}_2 \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} K_n^*(\tau_1, \dots, \tau_n; t_1) K_n^*(\tau_1, \dots, \tau_n; t_2) d\tau_1 \dots d\tau_n. \quad (8)$$

Теорема 2 свідчить про те, що система функціоналів (6) є ортогональною також і при зсувах у часі t . Остання властивість має фундаментальне значення для кореляційного аналізу нелінійних перетворень лінійних випадкових процесів.

Використовуючи для функціоналів (6) теорему 1, бачимо, що для них вірне співвідношення $M[Gn(t)] = 0$, $n = 1, 2, \dots$

Перехід до ортонормованої системи $\{\bar{Q}_n(t)\}_{n=0}^{\infty}$ легко здійснити за формулою $\bar{Q}_n(t) = Q_n(t) [M[Q_n^2(t)]]^{1/2}$, в якій вираз у фігурних дужках обчислюється згідно з теоремою 1.

В роботі показано, що побудована ортогональна система $\{Q_n(t)\}$ є повною в гільбертовім просторі $L_{2,\mathcal{P}}$ -функціоналів від лінійних випадкових процесів, де через \mathcal{P} умовно позначено імовірнісну міру, що відповідає функціоналам $Q_n(t)$.

В заключній частині четвертого розділу розглянуто конкретні приклади ортогональних систем як у вигляді $\{Gn(t)\}$, так і $\{Qn(t)\}$, які використовуються в наступних розділах роботи. Були розглянуті як стаціонарний, так і нестаціонарний варіанти ортогональних систем.

У п'ятому розділі роботи досліджуються питання аналізу нелінійних систем та пристроїв методом стохастичних ортогональних розкладань.

По-перше, розроблені основні принципи методу стохастичних ортогональних розкладань на базі побудованих у четвертому розділі ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами стосовно до кореляційного аналізу нелінійних систем обробки інформації при впливі безмежно подільних випадкових процесів. При цьому, зокрема, вказані умови, яким повинен задовольняти відгук нелінійної системи, що дозволяють використовувати

метод стохастичних ортогональних розкладань. Це перш за все умова обмеженості енергії відгуку, а також можливість його опису в термінах однорідних стохастичних функціоналів. В цьому плані в роботі досліджено ряд характерних для систем обробки інформації типів нелінійностей щодо можливості застосування до них методу стохастичних ортогональних розкладань. Це безінерційні нелінійності, що описуються аналітичними або поліноміальними функціями. Інерційні нелінійні системи, для яких зв'язок між входом і виходом описується функціональними поліномами Вольтерра. В цьому ж плані досліджені нелінійні системи, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями вигляду: $Ly(t) + F[y(t)] = \xi(t)$, де $\xi(t)$ - випадковий процес вигляду (1); $y(t)$ - випадкова функція, що описує відгук нелінійної системи; L - лінійний диференціальний оператор; $F(\cdot)$ - поліном від функції $y(t)$ та її похідних.

Одержані співвідношення, що описують залежність кореляційної функції відгуку нелінійної системи від кореляційної функції впливу. При цьому останній може бути як стаціонарним, так і нестаціонарним негауссовим процесом.

Досліджені питання точності опису відгуків нелінійних систем ортогональними рядами з використанням введеної в роботі функції відсутності однакових аргументів.

Нехай на вхід деякого нелінійного пристрою з характеристикою $F(x)$ діє лінійний випадковий процес вигляду (1). Якщо відгук $y(t) = F[\xi(t)]$ має скінченну енергію і може бути описаний в термінах однорідних стохастичних функціоналів, то його можна зобразити у вигляді ортогонального ряду

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n(t) \bar{Q}_n(t), \quad (9)$$

де $C_n(t) = M[y(t)\bar{Q}_n(t)]$ - узагальнені коефіцієнти Фур'є відгуку $y(t)$, які обчислюються на основі теореми 1. В цьому випадку математичне сподівання відгуку

$$M[y(t)] = m(t) = C_0(t), \quad (10)$$

а кореляційна функція

$$\begin{aligned} R(t_1, t_2) &= M\{(y(t_1) - m(t_1))(y(t_2) - m(t_2))\} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} C_n(t_1)C_n(t_2)M\{\bar{Q}_n(t_1)\bar{Q}_n(t_2)\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким чином, обчислення перших двох моментних функцій відгуку $y(t)$ нелінійної системи зводиться до обчислення узагальнених ко-

ефіцієнтів Фур'є $C_n(t)$ відносно ортогональної системи $\{Q_n(t)\}$ і до їх підсумовування. Тут треба відзначити, що особливість запропонованого методу полягає у тому, що обчислення коефіцієнтів Фур'є $C_n(t)$ здійснюється не на основі знання функцій розподілу вхідного процесу $\xi(t)$, а на основі знання його ядра $\varphi(\tau, t)$ і послідовності одновимірних семіінваріантів породного процесу при $\tau = 1$ згідно з теоремою 1. Це й дозволяє значно розширити можливості практичного вирішення проблем кореляційного аналізу нелінійних систем обробки інформації.

В цьому ж розділі розроблена методика визначення характеристичної функції відгуку нелінійної системи при дії безмежно подільного випадкового процесу з використанням теорії однорідних стохастичних функціоналів вигляду (2) або (2а). Так у загальному вигляді характеристична функція відгуку нелінійної системи N -го порядку запишеться так

$$f_y(u; t) = \sum_{n=0}^{\infty} (i\omega)^n \sum_{\substack{N \\ \sum k_j = n}} \frac{1}{k_1! k_2! \dots k_n!} \prod_{j=1}^N a_j^{k_j} M \Phi_{\sum j k_j} (t), \quad (12)$$

де друга сума поширюється на всі можливі неупорядковані способи розкладу числа n на суму N цілих додатних доданків k_j ; a_j - параметри системи.

Запропонований метод істотно спирається на положення і висновки, які випливають із теореми 1. В роботі одержано метод і алгоритм обчислення математичного сподівання $M \Phi_{\sum j k_j} (t)$ однорідного стохастичного функціоналу $\sum_{j=1}^N j k_j$ -го порядку, що й представляє со-

бов основу практичної реалізації формули (12). Розглянуто конкретний приклад знаходження характеристичної функції процесу на виході однорідної нелінійної системи типу квадратор при дії нестационарного лінійного випадкового процесу, породженого гама-процесом.

На основі функціональних рядів Водьєрра й теорії лінійних випадкових процесів розроблено метод, що дозволяє обчислювати вищі моментні функції відгуків інерційних нелінійних систем при дії безмежно подільних випадкових процесів. Так зм'яшений момент r -го порядку відгуку $y(t)$ нелінійної системи

$$M[y(t_1) \dots y(t_r)] =$$

$$= \sum_{n_1, \dots, n_r=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_{n_1}(\tau_1, \dots, \tau_{n_1}; t_1) \dots h_{n_r}(\tau_{\sum_{j=1}^r n_j}, \dots, \tau_{\sum_{j=1}^r n_j}; t_r) M \Phi_{\sum_{j=1}^r n_j}(\tau_1, \dots, \tau_{\sum_{j=1}^r n_j}) d\tau_1 \dots d\tau_{\sum_{j=1}^r n_j},$$

де $h_k(\tau_1, \dots, \tau_k; t)$ - ядро Вольтерра k -го порядку досліджуємої нелінійної системи. Знову ж таки, математичне сподівання функціоналу $\Phi_{\sum_{j=1}^r n_j}(\tau_1, \dots, \tau_{\sum_{j=1}^r n_j})$ знаходиться відповідно з положеннями теореми 1. Оригінальністю даного в роботі методу є те, що використання моделі безмежно подільних процесів і, зокрема, лінійних випадкових процесів дозволяє при знаходженні змішаного моменту r -го порядку відгуку обійтись без знання r -вимірного розподілу вхідного впливу. Достатньо знати в явному вигляді ядро впливу і одновимірну характеристичну функцію породного процесу або послідовність його одновимірних семіінваріантів у точці $\mathcal{T} = 1$.

Отже, в п'ятому розділі запропоновані конкретні методи, які дозволяють дослідникові або розроблювачу систем обробки інформації і управління проводити повний і всебічний стохастичний аналіз широкого класу нелінійних систем і пристроїв в умовах дії безмежно подільних процесів.

В шостому розділі розглянуті конкретні приклади використання розроблених у п'ятому розділі роботи методів визначення математичного сподівання і кореляційної функції відгуків деяких типових нелінійних пристроїв систем обробки інформації. Другими словами, в цьому розділі розглядаються конкретні приклади розв'язання добре відомої класичної задачі аналізу в рамках перших двох моментів відгуку нелінійного перетворювача при впливі на вхід визначеного випадкового процесу. Така задача ставилась і розв'язувалась багатьма авторами. Однак при цьому, в основному, робилось припущення, що на вхід нелінійного пристрою діє нормальний стаціонарний випадковий процес. В нашій же роботі, завдяки застосуванню в якості моделі вхідних впливів лінійного випадкового процесу вигляду (1), а також використання зображення відгуку нелінійного пристрою у вигляді ортогонального ряду, удається розв'язувати практично аналогічну задачу для більш широкого класу випадкових процесів, а саме, для процесів з безмежно подільними розподілами. При цьому діючі на вході процеси можуть бути як стаціонарними, так і нестаціонарними. Окрім цього, розширюється і клас нелінійних пристроїв. Тобто, вони можуть бути як безінерційними, так і інерційними.

Для побудови ортогональних розкладань відгуків використовуються ортонормовані стохастичні функціонали з індикаторною функцією, властивості яких розглянуто в четвертому розділі роботи. При проведенні конкретних обчислень робилось припущення, що діючі на вході процеси, зображувані лінійною моделлю (1), одержані в результаті фільтрації білого шуму конкретними реальними лінійними фізичними пристроями.

В роботі одержані результати аналізу в рамках кореляційної теорії конкретних типових нелінійних пристроїв систем обробки інформації, таких як квадратор, кутовий модулятор, згладжений обмежувач, типова радіотехнічна ланка при дії на їх вході суміші "корисного" сигналу і випадкового процесу. В якості "корисного" сигналу використовувались гармонійні коливання, а випадкові шуми описувалися конкретними моделями випадкових процесів, які породжені вінерівським, пуассонівським, гама-процесом. Результати обчислень проілюстровані відповідними графіками.

Проведено порівняння в рамках кореляційної теорії результатів дії на нелінійні пристрої перешкод, що описуються різними законами розподілу. Так, результати обчислень показують, що найбільш слабкою кореляційною залежністю володіє відгук, одержаний в результаті дії на вхід обмежувача імпульсного лінійного випадкового процесу, породженого гама-процесом.

Сьомий розділ роботи присвячено розв'язанню статистичних задач синтезу, а саме, розробці принципів і методів розпізнавання випадкових сигналів з використанням ортогональних стохастичних мір і функціоналів.

Спочатку розглядаються питання розпізнавання стаціонарних лінійних випадкових процесів з використанням спектральних мір. Для цього досліджені особливості гармонійного зображення стаціонарних лінійних випадкових процесів і зв'язаних з таким зображенням спектральних мір і спектральних щільностей. Показано, зокрема, що спектральна міра гільбертового стаціонарного лінійного випадкового процесу є абсолютно неперервною відносно міри Лебега. При цьому спектральна щільність потужності з точністю до постійного множника задається квадратом модуля фурь'є-перетворення ядра лінійного випадкового процесу. Одержано критерій абсолютної неперервності спектральних мір двох лінійних випадкових процесів, який полягає в тому, що одна спектральна міра абсолютно неперервна відносно другої, якщо вони є дробово-раціональні і границя відношення квадратів

модулів Фур'є-перетворень їх ядер визначається відношенням семіінваріантів другого порядку відповідних породних процесів в точці $T = 1$. Для цього випадку одержано також вираз для обчислення похідної Радона-Нікодіма.

Вказані вище результати аналізу спектральних мір лінійних випадкових процесів дозволили розробити принципи використання їх при розв'язуванні задач розпізнавання стаціонарних лінійних випадкових процесів. Для цього сформульовані вимоги до параметрів і характеристик лінійних випадкових процесів, при виконанні яких оцінки спектральних щільностей лінійних випадкових процесів є асимптотично нормальними. Для цієї ситуації розглянено особливості розпізнавання лінійних випадкових процесів у регулярному й сингулярному випадках. Одержані співвідношення для логарифму відношення правдоподібності і обчислення імовірності помилки прийняття рішення. Зазначимо, що критерії розпізнавання сигналів в даному випадку будувались на просторі оцінок спектральних щільностей з використанням теорії Неймана-Пірсона.

В другій частині сьомого розділу роботи досліджені принципи і методи розв'язування задачі розпізнавання випадкових сигналів, які являють собою результати нелінійних перетворень заданого гільбертового лінійного випадкового процесу, на просторі оцінок узагальнених коефіцієнтів Фур'є при фіксованому базисі ортонормованих стохастичних функціоналів від процесів з незадежними приростами. Для цього введено, відповідно з розглядаємими гіпотезами, імовірнісні міри на просторі оцінок узагальнених коефіцієнтів Фур'є. Одержано вираз для логарифму відношення правдоподібності і правило розпізнавання на основі критерія Неймана-Пірсона. Запропонована структурна схема пристрою, що реалізує вище згадане правило.

Розроблені принципи розпізнавання випадкових сигналів в узагальнених спектрах Фур'є можуть бути застосовані як у стаціонарному, так і нестаціонарному випадках. Окрім цього, у даному методі можлива реалізація сингулярного варіанту розпізнавання, наприклад, коли для однієї із гіпотез один або декілька узагальнених коефіцієнтів Фур'є для базису ортонормованих стохастичних функціоналів з індикаторною функцією дорівнюють нулю. Цей метод розпізнавання випадкових сигналів найбільш доцільно використовувати в задачах діагностики та прогнозу стану нелінійних систем обробки інформації і управління.

Суть, наукова новизна, застосовна направленість та практична значимість основних результатів виконаних досліджень полягає у наступному.

Сформульована, досліджена і розв'язана науково-технічна проблема розробки нових методів стохастичного аналізу динаміки нелінійних систем обробки інформації і управління та розпізнавання випадкових сигналів в узагальнених спектрах з використанням побудованих і досліджених у роботі ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами і моделей безмежно подільних процесів, що дають можливість отримувати більш вірогідні результати і для більш широкого класу нелінійних систем, включаючи й інерційні, при дослідженні їх в умовах впливу нестационарних і негауссових випадкових процесів.

Розв'язання сформульованої проблеми являє собою розв'язані в роботі наукові підпроблеми в наступних аспектах:

1. Розробка і теоретичне обґрунтування принципів і методів опису реальних радіофізичних випадкових сигналів і перехід з допомогою моделі лінійних випадкових процесів.

Показана добра узгодженість фізики утворення реальних випадкових радіофізичних процесів і явид з математичною моделлю у вигляді лінійного випадкового процесу. Одержано опис імпульсних і флуктуаційних як стаціонарних, так і нестационарних процесів. Показана велика "інформативність" ядра лінійного зображення, а саме, знання в явному вигляді ядра $\varphi(\tau, t)$ і трійки $\{\mu, \sigma \geq 0, L(\lambda)\}$ породного процесу повністю еквівалентно знанню послідовності скінченномірних характеристичних функцій або функцій розподілу лінійного випадкового процесу, що значно полегшує практичне застосування останнього.

2. Дослідження властивостей однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами.

Вперше одержано узагальнення властивостей поліноміальних стохастичних функціоналів на випадок однорідних стохастичних функціоналів з усяким інтегрованим у квадраті ядром, що значно розширює можливості застосування стохастичних функціоналів для розв'язування задач стохастичного аналізу нелінійних систем обробки інформації і, зокрема, методу стохастичних ортогональних розкладань. Основним результатом тут є теорема про математичне сподівання однорідного стохастичного функціоналу і її наслідки, а

також розроблений на їх основі алгоритм обчислення скалярного добутку для однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами.

3. Розробка нових методів побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів і дослідження їх властивостей.

Досліджено метод побудови ортогональних систем стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами, що базується на ортогоналізації за методом Грама-Шмідта нескінченної послідовності лінійно незалежних однорідних стохастичних функціоналів зростаючих степенів. Досліджені властивості такої ортогональної системи і, зокрема, доказана її повнота в відповідному гільбертовому просторі стохастичних функціоналів від лінійних випадкових процесів.

Вперше побудована оригінальна ортогональна система стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами на основі введеної в роботі індикаторної функції відсутності однакових аргументів. Досліджені її властивості. Зокрема, показано, що така система зберігає властивості ортогональності своїх елементів при зсувах їх у часі, що є основою для використання побудованої ортогональної системи для кореляційного аналізу нелінійних перетворень лінійних випадкових процесів.

4. Розробка і теоретичне обґрунтування методу стохастичних ортогональних розкладань для аналізу нелінійних систем при дії безмежно подільних випадкових процесів.

Вказані умови, яким повинен задовольняти відгук нелінійної системи, що дозволяють практично використовувати метод стохастичних ортогональних розкладань. Досліджені питання точності зображення відгуків нелінійних систем ортогональними рядами з використанням індикаторної функції. Конкретизація розробленого методу кореляційного аналізу стосовно до певних типів нелінійностей дає можливість досліджувати перешкодостійкість систем обробки інформації в рамках енергетичної теорії при дії нестационарних процесів аналітичними методами.

5. Розробка і теоретичне обґрунтування оригінальних методів аналізу нелінійних систем у строгому значенні на основі теорії однорідних стохастичних функціоналів.

Вперше розроблена методика визначення характеристичної функції відгуку нелінійної системи при впливі безмежно подільних випадкових процесів з використанням теорії однорідних стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами. На основі

функціональних рядів Вольтерра і теорії лінійних випадкових процесів розроблено метод, що дозволяє обчислювати вищі моментні функції відгуків інерційних нелінійних систем при дії безмежно подільних процесів, не уживаючи багатовимірні функції розподілу впливу і відгуку. Сформульовані результати дозволяють проводити повний стохастичний аналіз нелінійних систем обробки інформаційних сигналів при дії у загальному випадку нестационарних безмежно подільних випадкових процесів.

6. Аналіз конкретних типових нелінійних пристроїв систем обробки інформації запропонованим у роботі методом стохастичних ортогональних розкладань.

З метою апробації основних теоретичних положень розробленого методу стохастичних ортогональних розкладань, а також доведення його до можливості використання у конкретних інженерних обчисленнях здійснено аналіз у рамках кореляційної теорії конкретних типових нелінійних пристроїв систем обробки інформаційних сигналів, таких як квадратор, кутовий модулятор, згладжений обмежувач, типова радіотехнічна ланка при дії на їх входи адитивної суміші "корисного" сигналу і випадкової перешкоди, що описується безмежно подільним процесом.

7. Дослідження властивостей спектральних мір лінійних випадкових процесів.

Показано, що основні властивості спектральних мір лінійних випадкових процесів повністю визначаються властивостями ядер їх зображень. Це дозволило одержати критерій абсолютної неперервності спектральних мір лінійних випадкових процесів і вираз для обчислення похідної Радона-Нікодіма.

8. Розробка і дослідження методів розпізнавання лінійних випадкових процесів на основі їх спектральних мір.

На основі результатів, вказаних у попередньому пункті, досліджені особливості розпізнавання лінійних випадкових процесів у просторі оцінок їх спектральних щільностей потужності. Це дозволило одержати правило і запропонувати структурну схему відповідного пристрою для розпізнавання "корисних" сигналів на фоні перешкод, що описуються лінійними випадковими процесами.

9. Розробка і теоретичне обґрунтування методів розпізнавання випадкових процесів в узагальнених спектрах на основі методу стохастичних ортогональних розкладань.

Досліджені особливості розпізнавання випадкових сигналів у просторі оцінок узагальнених коефіцієнтів Фур'є при фіксованому

базисі ортонормованих стохастичних функціоналів. Зокрема, одержано вираз для логарифму[•] відношення правдоподібності і правило розпізнавання на основі критерія Неймана-Пірсона, що дозволяє, використовуючи побудовані в роботі ортонормовані базиси стохастичних функціоналів від процесів з незалежними приростами, розв'язувати такі застосовні задачі як діагностика, ідентифікація, прогноз стану нелінійних систем обробки інформації і управління.

Сформульовані підпроблеми утворюють в комплексі наукову проблему виконаного в роботі дослідження: розробки методів аналізу нелінійних систем обробки інформації і розпізнавання випадкових сигналів на основі безмежно подільних процесів з використанням стохастичних ортогональних м'р і функціоналів.

Практична значимість основних результатів роботи полягає в застосуванні їх для розробки нових перешкодостійких і удосконалення існуючих систем обробки інформаційних сигналів і управління з метою підвищення ефективності і точності їх роботи в реальних умовах. Одержані наукові результати знайшли впровадження у вигляді відповідних методик, використаних при вирішенні задач оцінки і підвищення точності АС УПР, при розробці перешкодостійких систем обробки акустичних сигналів, при розробці відповідних пакетів прикладних програм. Економічний ефект впроваджень складає близько 400 тис. крб. у цінах 1988 року (Додаток 2).

Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано у наступних роботах:

1. Бойко И. Ф. Ортогональные функционалы пуассоновского процесса в задачах преобразования информации //Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Матер. Укр. респ. НТК. - Киев: Знание, 1977. - С. 7 - 8.

2. Бойко И. Ф., Марченко Б. Г., Шутко Н. А. О системе ортогональных функционалов пуассоновского процесса //Радиотехническое оборудование аэропортов и воздушных трасс ГА: Сб. научн. тр. Вып. 1. - Киев: КИИГА, 1977. - С. 113 - 123.

3. Бойко И. Ф., Марченко Б. Г. Об одной системе ортогональных стохастических функционалов от процессов с независимыми приращениями //Радиотехническое оборудование аэропортов и воздушных трасс ГА: Сб. научн. тр. Вып. 2. - Киев: КИИГА, 1978. - С. 7 - 12.

4. Бойко И. Ф. Корреляционный анализ углового модулятора //Радиотехническое оборудование аэропортов и воздушных трасс ГА: Сб. научн. тр. Вып. 3. - Киев: КИИГА, 1979. - С. 25 - 30.

5. Мяслович М. В., Бойко И. Ф. Один метод определения разности

фаз моногармонических сигналов в условиях гауссовых помех //Радиотехническое оборудование аэропортов и воздушных трасс ГА: Сб. науч. тр. Вып. 3. - Киев: КИИГА, 1979. С. 82 - 86.

6. Бойко И. Ф., Марченко Б. Г., Шутко Н. А. К вопросу о нелинейных преобразованиях линейных случайных процессов //Пространственно-временная обработка сигналов: Сб. научн. тр. - Воронеж: ВГУ, 1980. С. 101 - 105.

7. Бойко И. Ф., Демьянчук В. С., Шутко Н. А. и др. Эксплуатационные методы летной проверки АС УВД и входящих в них источников координатной информации //Перспективы развития методов технической эксплуатации авиационной техники: Тез. докл. Всес. НТК. - Киев: КИИГА, 1979. - С. 17.

8. Бойко И. Ф., Красильников А. И., Марченко Б. Г. Характеристические функции безгранично делимых законов распределения в задачах преобразования информации. - Киев: Знание, 1980. - 25 с.

9. Бойко И. Ф., Красильников А. И. Об одном представлении характеристической функции отклика низкочастотного RC-фильтра на воздействие пуассоновского белого шума //Радиотехническое оборудование аэропортов и воздушных трасс ГА: Сб. научн. тр. - Киев: КИИГА, 1980. С. 90 - 93.

10. Бойко И. Ф. Корреляционная функция отклика сглаженного ограничителя //Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в ГА: Сб. научн. тр. - Рига: РКИИГА, 1980. С. 14 - 18.

11. Бойко И. Ф., Марченко Б. Г. Анализ воздействия линейных случайных процессов на типовое радиотехническое звено //Статистическая теория передачи и приема сигналов - 1: Труды восьмой Всес. конф. по теории кодирования и передачи информации, ч. 4. - М.-Куйбышев: Наука, 1981. - С. 27 - 31.

12. Бойко И. Ф., Марченко Б. Г. Анализ влияния негауссовых помех на нелинейные безынерционные устройства в рамках энергетической теории //Пространственно-временная обработка сигналов и учет влияния среды их распространения: Тез. докл. Всес. школы-семинара молодых ученых. - Харьков: ХАИ, 1980. - С. 9 - 11.

13. Велецкий А. Я., Бойко И. Ф., Демьянчук В. С. и др. Исследование влияния среды распространения на точностные характеристики радиоэлектронных систем управления воздушным движением и посадкой самолетов //Пространственно-временная обработка сигналов и учет влияния среды их распространения: Тез. докл. Всес. школы-семинара молодых ученых. - Харьков: ХАИ, 1980. С. 84.

14. Бойко И. Ф. Корреляционный анализ нелинейных инерционных

преобразований случайных процессов // Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в ГА: Сб. научн. тр. - Рига: РКИИГА, 1981. - С. 24-28.

15. Яншин В. В., Бойко И. Ф. Исследование последовательного обнаружения в системах пассивной радиолокации // Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в ГА: Сб. научн. тр. - Рига: РКИИГА, 1982. - С. 7-10.

16. Марченко В. Г., Бойко И. Ф. Вычисление корреляционной функции отклика квадратичного детектора при воздействии негауссового и нестационарного случайного процесса // Надежность радиоэлектронного оборудования гражданской авиации: Сб. научн. тр. - Киев: КИИГА, 1983. - С. 59-62.

17. Бойко И. Ф., Марченко В. Г. Прохождение линейных случайных процессов через нелинейные радиотехнические устройства // Статистические методы оценивания в теории и практике обработки сигналов и полей: Тез. докл. восьмого выездного семинара секции теории информации ЦП НТО РЭС им. А. С. Попова. - Воронеж: ВГУ, 1983. - С. 21-23.

18. Яншин В. В., Бойко И. Ф. Закон распределения времени последовательного усеченного обнаружения // Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в ГА: Сб. научн. тр. - Рига: РКИИГА, 1984. - С. 19-22.

19. Бойко И. Ф., Марченко В. Г. Анализ нелинейных преобразований импульсных случайных процессов методом ортогональных разложений // Статистические методы обработки сигналов и их практические применения: Тез. докл. девятого выездного семинара секции теории информации ЦП НТО РЭС им. А. С. Попова. - Харьков: ХИРЭ, 1985. - С. 84-86.

20. Бойко И. Ф. Прохождение импульсных линейных случайных процессов через радиотехнические цепи // Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в ГА: Сб. научн. тр. - Рига: РКИИГА, 1985. - С. 51-55.

21. Мазин Е. В., Яншин В. В., Бойко И. Ф. Анализ пропускной способности аэродромов при наличии приоритетов в обслуживании // Технологические процессы при эксплуатации радиоэлектронного оборудования гражданской авиации: Сб. научн. тр. - Киев: КИИГА, 1985. - С. 85 - 91.

22. Бойко И. Ф. Корреляционный анализ нелинейных преобразований негауссовых процессов // Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Тез. докл. Всес. НТК. - Киев: КИИГА, 1985. - С. 38 - 37.

23. Войко И. Ф. Вычисление обобщенных коэффициентов Фурье при стохастических ортогональных разложениях. // Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Тез. докл. Всес. НТК. - Киев: КИЛГА, 1985. - С. 35 - 36.

24. Войко И. Ф. Прогнозирование работоспособности авиационного оборудования, функционирующего в нестационарных условиях, методом стохастических интегральных представлений // Безопасность и эффективность эксплуатации воздушного транспорта: Тез. докл. Всес. НПК по безопасности полетов. - Л.: ОЛАГА, 1985. - С. 70 - 71.

25. Войко И. Ф. К вопросу о точности информационно-измерительных систем с учетом воздействия случайных помех // Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем: Тез. докл. Республ. НТК. - Киев: КПИ, 1985. - С. 57 - 58.

26. Войко И. Ф. Применение ортогональных случайных разложений случайных процессов при анализе нелинейных автоматических систем // Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами: Тез. докл. Всес. школы. - Харьков: ХИРЭ, 1986. - С. 61.

27. Войко И. Ф. Применение линейных случайных процессов при исследовании стохастических объектов // Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях: Тез. докл. НТК. - Киев: КПИ, 1986. - С. 15 - 16.

28. Войко И. Ф. К вопросу о помехоустойчивости бортовых радиозлектронных устройств // Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Тез. докл. Всес. НТК. - Киев: КИЛГА, 1985. - С. 14.

29. Войко И. Ф., Марченко В. Г. Анализ нелинейных преобразований сигналов в системах диагностики с использованием стохастических ортогональных разложений. Препринт - 542 Ин-та электродинамики АН УССР. - Киев, 1987. - 57 с.

30. Войко И. Ф. Анализ нелинейных радиотехнических систем при воздействии линейных случайных процессов // Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Тез. докл. Всес. НТК. - Киев: КИЛГА, 1988. - С. 149.

31. Войко И. Ф. Стохастические ортогональные разложения случайных процессов и полей, порождаемых безгранично делимыми функциями // Статистика случайных полей. Обработка изображений: Тез. докл. НТС. - Красноярск: КГУ, 1988. - С. 12.

32. Войко И. Ф., Марченко В. Г. Безгранично делимые случайные

процессы и их приложения //Методы представления и обработки случайных сигналов и полей: Тез. докл. Всес. НТК. - Харьков: ХИРЭ, 1989. - С. 10.

33. Бойко И. Ф. Методы стохастического анализа обработки радиотехнической информации //Проблемы совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов: Тез. докл. Всес. НТК. - Киев: КИИГА, 1989. - С. 72.

34. Программа и методика летной проверки посадочных радиолокаторов /В. С. Демьянчук, Н. А. Шутко, Б. Р. Марченко, И. Ф. Бойко и др. - Киев: КИИГА, 1977. - 35 с.

34. Бойко И. Ф. Спектральные меры линейных случайных процессов и их применения в задачах обнаружения и оценки //Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей: Тез. докл. Украинской респ. школы-семинара. - Черкассы: ЧФ КПИ, 1991. - С. 23.

35. Бойко И. Ф., Марченко В. Р. Об абсолютной непрерывности спектральных мер линейных случайных процессов //Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей: Сб. научн. тр. - Киев: УМК ВО, 1991. - С. 24 - 27.

36. Бойко И. Ф., Шутко Н. А., Шелевицкий И. В. Параметрическая идентификация радиоэлектронных систем с помощью сплайн-функций //Проблемы совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов: Сб. научн. тр. -Киев: КИИГА, 1990. - С. 100 - 107.

37. Бойко И. Ф., Шутко Н. А., Шелевицкий И. В. Статистическая идентификация линейных динамических систем с помощью сплайнов //Повышение эффективности функционирования радиоэлектронных систем: Сб. научн. тр. - Киев: КИИГА, 1992. - С. 93 - 98.

38. Бойко И. Ф., Матиборский В. В., Скрипец А. В. и др. Сплаины в задачах обработки полетной информации //Проблемы совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов: Тез. докл. Межд. НТК. - Киев: КИИГА, 1992. - С. 46.

39. Бойко И. Ф., Шелевицкий И. В., Шутко Н. А. Стохастический анализ радиоэлектронных систем и комплексов //Проблемы совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов: Тез. докл. Межд. НТК. - Киев: КИИГА, 1992. С. 34 - 35.

40. Бойко И. Ф., Шелевицкий И. В., Шутко Н. А. Статистическая идентификация линейных динамических систем с помощью полиномиальных сплайнов //Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Тез. докл. Межд. НТК. - Киев: КИИГА, 1992. - С. 94.

41. Бойко И. Ф., Бедный Н. С. Вычисление средних значений стохастических функционалов от процессов с независимыми приращениями, ядра которых аппроксимированы сплайнами // Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов: Тез. докл. Межд. НТК. - Киев: КИИГА, 1992. - С. 14 - 15.

42. Бойко И. Ф. Метод стохастических ортогональных разложений и его применение в радиофизике // Методы представления и обработки случайных сигналов и полей: Тез. докл. 2 Всес. НТК. - Харьков: ХИ-РЭ, 1991. - С. 20.

43. Бойко И. Ф., Марченко В. Г. Линейные случайные процессы и их приложения в статистической радиофизике // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів: Зб. наук. праць, ч. 1. - Харків: ХІРЕ, 1992. - С. 47 - 62.

44. Бойко И. Ф. Спектральные меры линейных случайных процессов при их нелинейных преобразованиях // Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів: Зб. наук. праць, ч. 1. Харків: ХІРЕ, 1992. - С. 63 - 67.

45. Бойко И. Ф., Марченко В. Г. Распознавание случайных сигналов с использованием спектральных мер линейных случайных процессов // Методы распознавания изменений в случайных процессах и полях: Тез. докл. Межд. конф. ChanBe'92. - Киев: 1992. - С. 27 - 28.

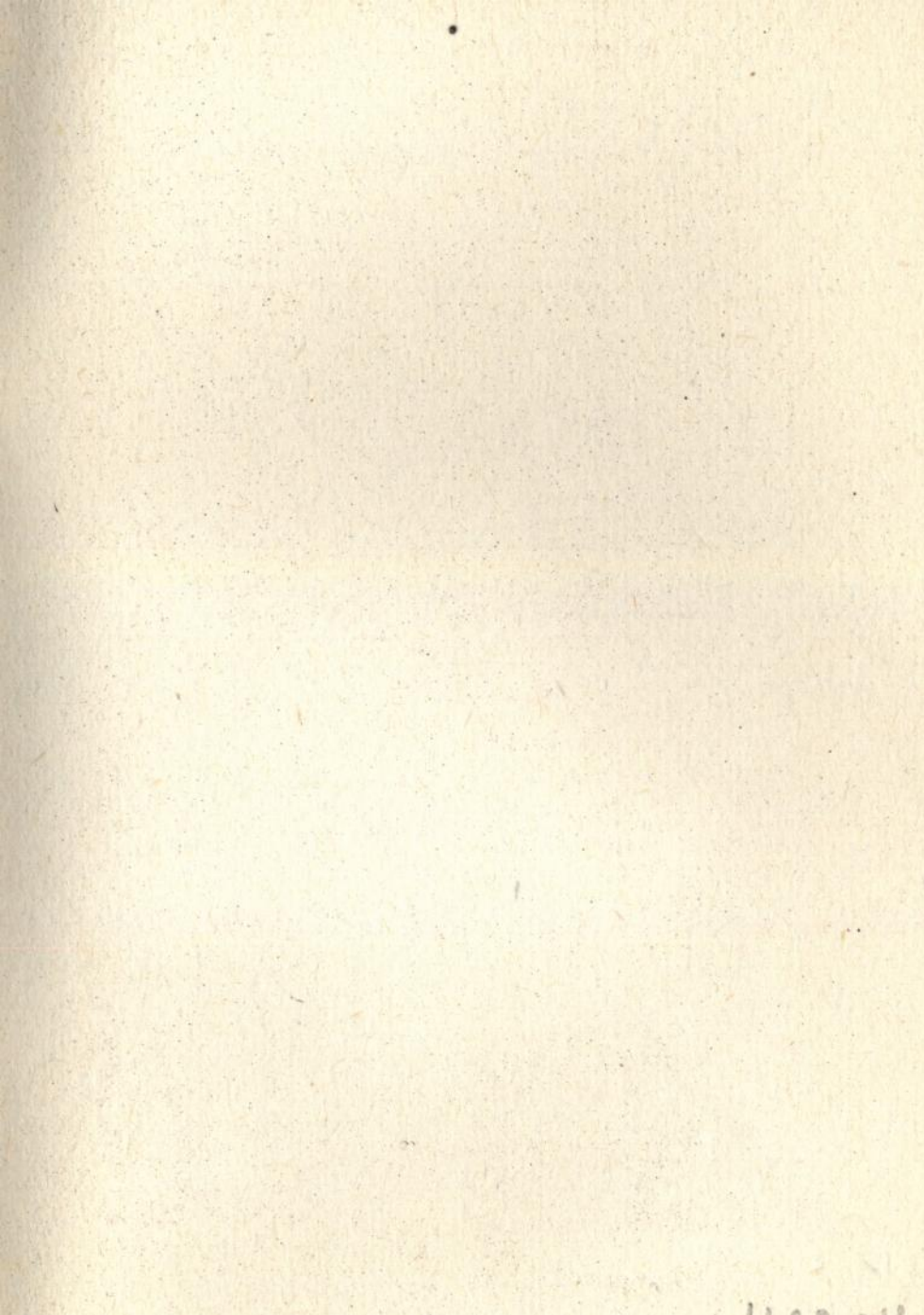
46. Бойко И. Ф., Бедный Н. С. Применение сплайнов в задачах прогноза с использованием модели линейного случайного процесса // Методы управления системной эффективностью функционирования электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов: Тез. докл. 2 Межд. НТК. - Киев: КИИГА, 1993. С. 94 - 95.



Підписано до друку 23.11.2007 Формат 60x84/16. Папір друкарський.
Обсетни. друк. Ум.барбоїд.Ф.Ум.вид.арк. 1,06. Обл.вид.арк. 2,0.
Тираж 100 прим. Замовлення Г245-І. Ціна Інд. К239/У11.

Видавничого ІДЦА.

25.058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.



AB 28.546