

Г.В. Альшин, С.В. Панченко, С.І. Приходько

**ОСНОВИ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ
СИСТЕМ**

Навчальний посібник

Харків 2012



УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Г.В. Альшин, С.В. Панченко, С.І. Приходько

**ОСНОВИ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ
СИСТЕМ**

Навчальний посібник

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді
та спорту України як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів*

Харків 2012

УДК 621.396.6
ББК 39.279
А 56

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (№ 1/11-9810 від 18.06.12 р.)

Рецензенти:

В.А. Краснобаєв, д-р техн. наук, професор (ХДТУСГ)
Н.Н. Горобець, д-р физ.-мат. наук, професор
(ХНУ ім. В.М. Каразіна),

А 56 Основи систем автоматизованого проектування інформаційно-вимірювальних систем: Навч. посібник / Г.В. Альошин, С.В. Панченко, С.І. Приходько. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 62 с.
ISBN 978-966-2033-85-4

Навчальний посібник містить нові аспекти та підходи до побудови систем автоматизованого проектування на рівні інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Пропонується системний підхід до САПР ІВС у якості комплексної задачі визначення їх оптимальних структур, оптимальних технічних параметрів та сигналів при заданих тактико-технічних вимогах, які також підлягають оптимізації за заданим критерієм якості. Книга містить поняття і визначення якості та критеріїв якості ІВС, проблем створення САПР ІВС, приклад розв'язання задачі оптимізації параметрів ІВС, принципи і співвідношення для автоматичного визначення оптимальних технічних параметрів.

Метою книги є заповнення прогалів між існуючими автоматизованими алгоритмічними програмами розрахунку оптимальних параметрів функціональних елементів ІВС і потрібними програмами розрахунку оптимальних ІВС.

Книга корисна студентам та фахівцям радіоелектронних систем.

УДК 621.396.6
ББК 39.279

ISBN 978-966-2033-85-4

© Українська державна академія залізничного транспорту, 2012.

Навчальний посібник

Альошин Геннадій Васильович,
Панченко Сергій Володимирович,
Приходько Сергій Іванович

ОСНОВИ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Відповідальний за випуск Альошин Г.В.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 21.09.12 р.

Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,25. Тираж 300. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту
61050, Харків - 50, майдан Фейербаха, 7
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Українська державна академія залізничного транспорту

Г.В. Альшин, С.В. Панченко, С.І. Приходько

**ОСНОВИ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Навчальний посібник

Харків 2012

УДК 621.396.6

ББК 39.279

А 56

Затверджено Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів (№ 1/11-4032 від 26.03.12 р.)

Рецензенти:

В.А. Краснобаєв, д-р техн. наук, професор (ХДТУСГ)
Н.Н. Горобець, д-р физ.-мат. наук, професор
(ХНУ ім. В.М. Каразіна),

Основи систем автоматизованого проектування інформаційно-вимірювальних систем: Навчальний посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 62 с.
ISBN 978-966-2033-85-4

Навчальний посібник містить нові аспекти та підходи до побудови систем автоматизованого проектування на рівні інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). Пропонується системний підхід до САПР ІВС у якості комплексної задачі визначення їх оптимальних структур, оптимальних технічних параметрів та сигналів при заданих тактико-технічних вимогах, які також підлягають оптимізації за заданим критерієм якості. Книга містить поняття і визначення якості та критеріїв якості ІВС, проблем створення САПР ІВС, приклад розв'язання задачі оптимізації параметрів ІВС, принципи і співвідношення для автоматичного визначення оптимальних технічних параметрів.

Метою книги є заповнення прогалін між існуючими автоматизованими алгоритмічними програмами розрахунку оптимальних параметрів функціональних елементів ІВС і потрібними програмами розрахунку оптимальних ІВС.

Книга корисна студентам та фахівцям радіоелектронних систем.

УДК 621.396.6

ББК 39.279

ISBN 978-966-2033-85-4

© Українська державна академія залізничного транспорту,
2012.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Призначення та проблеми САПР інформаційно-вимірювальних систем	5
1.1. Відомі, але систематизовані принципи наукових та ненаукових досліджень	7
1.2. Поняття про якість системи, об'єкта або процесу	10
1.3. Порівняльні характеристики критеріїв якості систем ...	12
1.4. Етапи постановки та розв'язання задач оптимізації складних систем	15
1.5. Прийняття рішення в умовах невизначеності	18
2. Загальні питання оптимізації ІВРТС	19
2.1. Сучасний стан проблеми оптимізації ІВРТС за багатьма показниками якості	20
2.2. Ефективність складних інформаційно-вимірювальних систем	25
3. Параметричний синтез інформаційно-вимірювальних систем	28
3.1. Показники якості радіотехнічних систем	28
3.2. Вартість блоків системи як обмеження на відповідні технічні параметри	30
3.3. Структура оптимізованої системи й позначення її технічних параметрів	34
3.4. Формалізація цільової функції в задачі оптимізації вимірювальної системи	38
3.5. Постановка задачі оптимізації ІВРТС	43
3.6. Розв'язання задачі оптимізації ІВРТС	48
3.7. Оптимальні параметри систем	52
3.8. Приклад оптимізації системи за трьома параметрами ...	55
Висновки	58
Бібліографічний список	60

ВСТУП

Системи автоматизованого проектування (САПР) телекомунікаційних або інформаційно-вимірювальних радіотехнічних телекомунікаційних систем (ІВРТС) є логічно зв'язаною сукупністю програм, що дозволяє отримувати на етапі ескізного проектування систем їх облік, структури, параметри та сигнали, що визначають задані тактико-технічні вимоги (ТТВ). На даному етапі найбільш доцільно без суттєвих матеріальних втрат використовувати САПР телекомунікаційних систем (ТС).

Жорсткі умови конкуренції на ринку виробництва та експлуатації ТС ставлять свої вимоги як до систем, так і до САПР. Тому проєктовані системи повинні бути не просто допустимі [10, 11], але й оптимальні за заданим списком показників якості. А програми автоматизованого проектування повинні використовувати всі останні досягнення науки і техніки для створення оптимальних систем або близьких до оптимальних систем.

Поняття оптимальності систем повинно бути пов'язаним з поняттям їх якості, з поняттям багатofункціональності систем, з багатокритерійністю, багатовимірністю задач, з технологічністю і т. ін. Тому САПР ТС повинна вміщувати у своєму складі всі вказані напрями у науці й техніці. Тому що все найбільш істотне у системах повинно бути враховано ще на етапі ескізного проектування. Але оскільки все врахувати практично не можливо, то це слід робити за відомими вузькими напрямками науки й техніки та конкретно за відомими найбільш потрібними системами.

Отже, оптимізація систем будь-якої складності за заданими ТТВ повинна враховувати їх реалізованість і технологічність, мати своєю кінцевою метою створення системи у вигляді проєктної моделі на етапі ескізного проектування, де доцільніше за все використовувати САПР.

1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПРОБЛЕМИ САПР

Виходячи з вищезгаданого, САПР ТС повинна враховувати такі складові частини у своєму програмному продукті:

1) прийнятті подання і результати науки й техніки у даній галузі [1-11];

2) результати використання математичних методів у даній галузі [14];

3) результати використання сучасних технологій при виробництві розглянутих ТС [16,18,20,22,26];

4) результати створення програмного продукту [27, 31, 36, 38];

5) методи оптимізації програмного продукту [36, 38].

Іншими словами, САПР ТС повинна являти собою узагальнений, науковий підхід при створенні систем, що враховує всі п'ять указаних складових. Однак рівень їх застосувань, на відміну від абстрактної науки, повинен бути наближений до реальних систем.

Під програмним продуктом у даному навчальному посібнику слід розуміти не методи програмування якою-небудь машинною мовою, що теж необхідно, а розрахункові співвідношення для цього, принципи, закони природи у техніці, що потрібні для прийняття кращого (оптимального) обгрунтованого рішення для створення ТС.

Оскільки САПР являє собою інформаційну інтелектуальну систему, призначену для створення реальних складних і дорогих ТС, то на складову інформацію накладаються також жорсткі умови достовірності й умови персональної відповідальності за неї виконавців. У математиці виконавця називають також «особа, що приймає рішення» (ОПР) [10, 11].

Очевидно, що задачі САПР істотно складні й відповідальні. Тому складні ТС розробляються у науково-дослідних інститутах або конструкторських бюро, де у наукових колективах використовується розподіл праці, інформаційні бази знань і досвід створення й експлуатації ТС. Вартість робіт з проектування ТС іноді майже не досягає вартості їх виробництва.

Розподіл праці підвищує загальну спроможність виробництва і якість науково-технічних рішень, але ускладнює питання стикування вузьких напрямків. Тому у колективах

повинні бути спеціалісти – системники, які спроможні приймати обґрунтовані (оптимальні) рішення на більш загальних ієрархічних рівнях ТС.

Основним призначенням САПР ТС повинно бути отримання та накопичування загального взаємозв'язаного та сукупного програмного продукту для ТС, його офіційного визнання та узаконювання для використання у реальних перспективних системах.

Цей програмний продукт повинен зберігатися як база сучасних знань, які повинні періодично перевірятись, уточнюватись, узаконюватись і використовуватись.

Цей продукт доцільно у масштабі держави (наприклад в інституті патентних експертиз) накопичувати (можливо й викуповувати), зберігати і на принципах самоокупованості видавати приватним розробникам систем.

Потрібно в'яснити, спочатку у загальних рисах, що вже є для створення САПР і яких проблем зазнає САПР при її створенні для будь-яких радіоелектронних систем.

Будь-яка радіоелектронна й інформаційно-вимірювальна система потребує для свого створення прийняття сукупності рішень одразу на трьох взаємозв'язаних множинах: структур, сигналів і технічних параметрів.

У даній роботі для спрощення береться до уваги лише один з ієрархічних рівнів – це саме системи передачі інформації зі своїми функціональними елементами, або лінії зв'язку.

Існуюча множина реалізацій реальних систем дозволяє використовувати техніко-економічну статистику для прийняття рішень на всіх множинах показників і параметрів, що дає впевненість у її реалізованості, але не дає впевненості у її оптимальності за всім списком ТТВ.

Тобто проблемою №1 є створення парку задач оптимізації для реальних ТС та для різних призначень. Поки що відомі одиничні випадки розв'язань, але тільки для абстрактних задач оптимізації.

Проблемою №2 є використання більш повного складу ТТВ у задачах оптимізації.

Повноту використовуваного списку ТТВ будемо називати **адекватністю** опису потрібної якості.

Проблемою №3 є використання показників технологічності у задачах оптимізації.

1.1. Відомі, але систематизовані принципи наукових та ненаукових досліджень

До того, як приступати до принципів створення САПР ТС, назвемо деякі принципи наукових досліджень, без яких не обійтись.

Перший принцип назвемо, щоб запам'яталося, **«принципом Робінзона Крузо»**. Робінзон Крузо цілий рік довбав з твердого дуба великий човен. Видовбав, але не зміг дотягти його до океану. Це означає, що перш ніж що-небудь робити, слід оцінити, **навіщо вам це потрібно, що це вам дає і чи спроможні ви отримати результат.**

Другий принцип «бритва Оккама»: **«Не слід збільшувати кількість сутностей понад необхідність»**. Якщо є можливість не ускладнювати (не збільшувати) розгляд дій або завдань, то це раціонально робити.

Третій «принцип головного». Те, що ви спростили, повинно бути **головним** для вас, для особи, яка приймає рішення. Тому, якщо ви не встигли у другорядних справах, то втрати будуть малими.

Четвертий «принцип компромісу, або оптимуму»: якщо взяти занадто багато якого-небудь фактора, то буде погано з однієї причини, а якщо занадто мало, то буде погано з іншої причини. Тобто існує оптимум, компроміс між двома неприємностями («жорнами»). Ми віддаляємося від обох неприємностей. Цей евристичний чи строгий оптимум називається почуттям міри.

П'ятий «принцип достовірності» – істотною цінністю інформації є її достовірність. Саме вона визначає доцільність використання інформації. Якщо ймовірність повідомлення рівна $\frac{1}{2}$, то воно взагалі безкорисливе. Крім того, чим простіше пояснення

гіпотез або інформації, тим вони більш вірогідні за інших рівних умов.

Достовірність інформації підвищується за шкалою:
1) від авторитету; 2) з використанням логіки; 3) з використанням досвіду (факту); 4) з використанням їх незалежних комбінацій та їх кількості.

Під логікою розуміється логічний, причинно-наслідковий зв'язок або логічне співвідношення декларованих відомостей і незалежних фактів.

Шостий «принцип адекватності» – повнота опису системи, її якості або ефективності.

Сьомий «принцип використання аналогій» – використання головного складу суттєвих ознак, принципів або якостей системи для досягнення іншої мети чи кращої якості шляхом підміни частини її якостей потрібними якостями з аналога.

Більш повні рекомендації для ефективних наукових досліджень, ніж Оккама, виклав Декарт у вигляді п'яти принципів:

- 1) не поспішати з висновками;*
- 2) позбавлятися упередженості;*
- 3) робити, якщо можна, більш повні огляди того, що зроблено попередниками;*
- 4) кожне питання розкладати на більш прості питання або завдання (це завдання аналізу);*
- 5) розпочинати рішення від простого до складного (це завдання поступового поетапного синтезу моделі).*

Ці теоретико-пізнавальні (гносеологічні) принципи є більш повною основою для ефективного досягнення мети наукових досліджень.

Розглянемо сутність кожного принципу Декарта.

Перший принцип Декарта означає таке. Необхідно, якщо можна, підвищувати час спостереження за чим-небудь або набирати необхідну статистику, щоб випадковості менше діяли на результат, чи розглядати те саме з різних боків або за допомогою декількох спостерігачів (плюралізм). Це дозволяє підвищити достовірність результату спостереження або

висновків, а також знайти інші, більш ефективні шляхи вирішення завдань.

Другий принцип Декарта радить бути більш гнучким і не зациклюватись на одній ідеї, якою б вона хорошою не вважалася, і поглянути на предмет досліджень з іншого боку. Тобто принцип радить відтворити плюралізм самим дослідником, не залучаючи сторонню кваліфіковану допомогу, яку нелегко отримати. Це також повинно підвищити достовірність результатів, а також побачити інші, може більш ефективні, шляхи вирішення завдань.

Третій принцип Декарта означає нарощування бази даних з метою знайти якщо не те, що потрібно, то хоча б близький аналог. Цей принцип і дозволяє оцінити новизну й корисність результатів рішення завдань шляхом виключення повторного їх рішення. Крім того, він включає плюралізм за рахунок поглядів попередників, тобто може дозволити розгледіти ті ж завдання з іншого боку чи підказати інші шляхи їх вирішення.

Четвертий принцип Декарта – це фактично аналіз складних попередніх даних і використання, безумовно спрощених, постановок, рішень завдань і результатів. Це по суті є принцип У. Оккама.

П'ятий принцип Декарта – це принцип багатоетапності, тобто порада використання поступового ускладнення постановок і рішень завдань, порада поступового (поетапного) синтезу систем або процесів за поступово ускладненими даними і від головних показників до менш істотних.

Спрощений варіант чого-небудь звичайно називають **моделлю**.

Тобто модель – це спрощене абстрактне або матеріальне подання дійсності або будь-якої сутності.

Моделлю може бути абстрактний або матеріальний опис системи, її якість, постановка та модель вирішення завдань за У. Оккамою, за Р. Декартом або за Р. Беллманом.

Принципи У. Оккама або Р. Декарта обмежують зверху лише складність. Однак, як правило, існує й інша грань, протилежна надлишковій складності, – переспрощення завдань. Про це свідчить більш повний принцип Р. Беллмана [36, 38]: **«Дослідник подібний до мандрівника, що йде по вузькій стежинці між болотом переускладнення та пасткою переспрощення».**

Переспрощення завдань – це таке надлишкове спрощення, при якому модель (чи проект) стає зовсім неадекватною системам, об'єктам чи їх проектам і процесам. Тобто похибка опису є недопустимо великою.

Якість навіть не занадто «складної» сутності практично завжди описується декількома показниками якості, що бувають у протиріччі насамперед із витратними показниками і між собою.

Як мінімум один з показників якості являє собою хоча б одну корисну якість, а другий – витратний показник. З точки зору прикладної математики, що використовується для оптимізації систем, вони всі рівноправні.

1.2. Поняття про якість системи, об'єкта або процесу

Під якістю системи, об'єкта або процесу будемо розуміти одну або сукупність їх корисних і витратних якостей, що визначають та відрізняють систему, об'єкт або процес від інших аналогічних.

Суттєвим при оцінці якості системи, об'єкта або процесу є визначення їх ступеня корисності для використання за потрібним призначенням особою, що приймає рішення (ОПР) [10, 11].

Числове значення певної якості системи називається показником її якості.

Іноді кожний показник якості системи називається критерієм якості. У цьому випадку опис системи багатьма показниками якості часто називають **багатокритерійним описом якості системи** [10, 11], а **вирішувані завдання – багатокритерійними завданнями.**

Якщо сукупність таких критеріїв якості розташувати у ряд (ранжувати) за ознаками їх значущості або корисності для системи, або для застосування системи, то такий вектор критеріїв якості називають **лексикографічним критерієм якості** [10, 11].

Очевидно, що для застосування у завданнях або неможливо врахувати всі численні показники якості системи (або «критерії», згідно з термінологією [10, 11]), або недоцільно, згідно з викладеними принципами У. Оккама, Р. Декарта і Р. Беллмана.

Тому принаймні спочатку слід обмежувати склад критеріїв якості, враховуючи їх важливість, корисність і визначаючи достатню простоту для отримання можливості постановки та вирішення завдань. Тобто спочатку вирішуються завдання для спрощеної моделі, а потім – для більш адекватних моделей або образів, або міркувань, або проектів.

Використання абстрактних моделей більш ефективно, оскільки їх легше, швидше та дешевше будувати і розвивати, ніж реальні матеріальні моделі. Використання проектів систем, об'єктів і процесів настільки ефективно, що практично завжди ці проекти використовуються при їх описі й абстрактному поданні у вигляді відомих ідей, креслень та відомих формул, апробованих та засвідчених підписами, особливо для удосконалення важливих або дорогих систем, об'єктів або процесів. Саме так поки що подають призначення САПР ТС.

Завдання пошуку оптимальної радіоелектронної системи повинне бути у тому, щоб знайти кращу систему на множинах технічних параметрів, сигналів і структур за заданим критерієм якості і списком тактико-технічних вимог (ТТВ).

Узагальненим показником якості системи будемо називати його багатовимірну залежність від сукупності показників якості або сам список цих показників.

Правило або припис, які потрібно застосувати до узагальненого показника якості або до сукупності показників якості, щоб отримати кращу систему, називається критерієм якості. Це сучасне визначення поняття «критерій».

Згідно з «принципом головного» спочатку необхідно залишати у постановці завдань і задач найбільш важливі вихідні дані і вагомі показники якості. І якщо задача або завдання складні або безмежні, тільки тоді користуватись принципами У. Оккама, Декарта, Р. Беллмана.

У відомій літературі [10, 11] вводиться поняття «умовний критерій переваги» (УКП). Умовному критерію переваги відповідає один з таких методів використання вектора показників якості у задачах пошуку кращої системи:

- 1) метод, заснований на введенні результуючого показника якості;
- 2) мінімаксний метод;

3) метод переведення всіх показників якості, за винятком одного, який вважають **цільовою функцією (або функцією мети, корисності)**, у розряд обмежень (або **функцій зв'язку**);

4) метод послідовних поступок;

5) комбіновані методи.

Про застосування методів будемо судити згідно з методом виключення з даного списку.

Метод послідовних поступок належить до лексикографічних (ранжованих за вагомістю) критеріїв якості, що для технічних систем, об'єктів і процесів не завжди доцільно. До того ж можливості методу обмежені і дозволяють лише порівнювати системи, а не знаходити оптимальні системи.

Мінімаксий метод може використовуватися для побудови систем з невизначеними умовами функціонування. Головна проблема у таких завданнях – отримання платіжних матриць. І вирішення такого завдання, тобто отримання кращого рішення, ефективно тільки у найгіршому випадку, що не завжди доцільно.

Залишаються інші методи використання вектора показників якості систем. Найчастіше використовують методи, засновані на введенні результуючого показника якості і на переведенні всіх показників якості, за винятком одного, у розряд обмежень.

Ці методи зводяться звичайно до **математичного програмування**. **Це найкращі методи за ознакою об'єктивності**, оскільки суб'єктивність завжди несе у собі суб'єктивні похибки.

1.3. Порівняльні характеристики критеріїв якості систем

Під **оптимальним значенням критерію оптимальності** [10, 36, 37] будемо розуміти один з трьох видів:

1) значення критерію, заснованого **на отриманні екстремального значення** шляхом визначення похідних за кожною змінною, прирівнювання їх до нуля і розв'язання отриманої системи рівнянь;

2) значення критерію, заснованого на **отриманні кращого значення на відрізьку монотонних кривих**;

3) значення критерію, заснованого на принципі достатності, тобто для кривих типу насичення не слід вибирати занадто великі значення параметрів, що не приводять до суттєвого покращення критерію, хоча при цьому більші значення цього параметра приводять до великих витратних показників.

Тому слід обмежитися лише розумними їх значеннями. Наприклад, для ймовірності правильного виявлення не слід вибирати занадто велике значення енергетичного потенціалу, виходячи з інших міркувань – для зменшення витрат.

При знаходженні одного з видів значення оптимальності за яким-небудь умовним критерієм переваги (УКП) $f[\bar{D}(\bar{X})]$ важливо, щоб існувала область визначення критерію $\{\bar{X}\}$ і область його значень. Під символом $f[\bar{D}(\bar{X})]$ тут розуміється функція (або функціонал) від вектора показників якості $\bar{D}(\bar{X})$, залежного від вектора технічних параметрів \bar{X} . Для цього показники якості повинні бути взаємонезалежними [2 - 4].

Ідеально було б отримати критерій переваги у вигляді функціонала мети функціонування системи $p_m = p_m(\bar{D}(\bar{X}))$. Однак для складних систем це звичайно не вдається.

У такому випадку використовуються нижчеперераховані критерії оптимальності.

1. **Зважений критерій** $f_1 = \min_{\{\bar{X}\}} \sum_{i=1}^n \xi_i D_i(\bar{X}),$

де $\min_{\{\bar{X}\}}$ означає мінімум або інфімум (менше значення на множинах або в області допустимих значень параметрів).

Основна перевага такого критерію – простота.

Основний недолік – інтуїція, або довільність у виборі вагових коефіцієнтів ξ_i .

2. **Відносний критерій** f_2 , у чисельнику якого або один показник, або зважений додаток значущих показників $D_j(\bar{X})$, таких, що чим вони більші, тим краще, а у знаменнику – зважений додаток витратних показників $D_k(\bar{X})$.

$$f_2 = \max_{\{\vec{X}\}} \frac{\sum_{j=1} \xi_j D_j(\vec{X})}{\sum_{k=1} \xi_k D_k(\vec{X})}.$$

Перевага відносного критерію – порівняна простота.

Недоліки – інтуїція у виборі вагових коефіцієнтів та вплив гіперболічної залежності знаменника, що призводить до обмеженості використовуваного діапазону змінних.

3. **Векторний критерій** якості Парето [10, 11]: якщо всі компоненти (показники якості) одного вектора такі, що чим менше, тим краще, і вони менше відповідних компонент іншого вектора, то перша система краща за другу.

$$\vec{D}(\vec{X}) = \left\{ \frac{D_1(\vec{X})}{D_k(\vec{X})} \right\}.$$

Переваги – простота застосування, залежність від технічних параметрів не завжди потрібна. Тому цей критерій найбільш простий для порівняння якості систем.

Недоліки критерію – **непорівнянність векторів**, якщо хоч би одна компонента одного вектора краща, ніж у другого вектора, то друга компонента навпаки – гірша.

Для цього найбільш розповсюдженого випадку є, також непростий, метод послідовних поступок.

4. **Умовний критерій якості**, або умовний екстремум f_3

$$f_3 = \min_{\{\vec{X}\}} D_1(\vec{X}),$$

$$D_2(\vec{X}) \leq D_{2 \text{ доп}}$$

при \dots ,

$$D_n(\vec{X}) \leq D_{n \text{ доп}}$$

де $D_{i \text{ доп}}$ - допустиме значення $D_i(\vec{X})$.

Переваги критерію – нема вагових коефіцієнтів і тому нема суб'єктивізму, довільність при їх виборі.

Цей критерій якості найбільш об'єктивний.

Безумовно, при виборі складу показників якості все одно є деяка довільність, або інтуїція дослідника. Однак це стосується всіх критеріїв якості рівною мірою.

Недоліки умовного критерію якості – **складне розв'язання** задачі із застосуванням методу множників Лагранжа чи методу підстановки параметрів з рівнянь зв'язку у цільову функцію, чи методу математичної індукції для однотипних функцій. Крім того, можуть бути неприємності, пов'язані з неоднаковістю розв'язання, з **подвійним розв'язком**, якщо за цільову функцію взяти з обмежень інший показник.

1.4. Етапи постановки та розв'язання задач оптимізації складних систем

Під складними розуміються такі системи, що описуються багатьма показниками якості. Поняття «складна система» дещо умовне, оскільки ступінь корисності будь-якої системи з достатньою точністю подання ефективності описується не тільки одним яким-небудь показником якості функціонування, але й відповідним витратним показником, що також має пряме відношення до якості функціонування системи.

Тобто якість функціонування системи ніби «купується» ціною яких-небудь витрат або ціною погіршення якості інших показників. Тому під «складною» системою можна розуміти також систему, що описується числом показників якості, не меншим двох.

Етапи постановки та розв'язання задач оптимізації складних систем з урахуванням відомих принципів наукових досліджень:

- 1) формування списку, складу або вектора показників якості системи;
- 2) ранжування показників якості за принципом корисності їх для системи;

- 3) виявлення «бойових» показників якості систем або суттєвих показників за ознакою корисності і за умовами їх застосування;
- 4) виявлення істотних витратних показників системи;
- 5) виявлення істотних обмежень для функціонування системи;
- 6) виявлення рівноправних за значущістю показників за пп. 3-5;
- 7) спрощення задачі за рахунок зменшення складу показників якості, тобто залишається як можна менше число «бойових» показників, але обов'язково серед них є витратний або суперечливий показник;
- 8) якісно, можливо спрощеними графіками або на ПЕОМ, виявляють характер показників якості, їх незалежність, суперечливість, монотонність, одномодальність (один екстремум) і т.ін.;
- 9) вибирається узагальнений показник якості і критерій якості системи;
- 10) інтуїтивно оцінюється наявність оптимуму за загальним показником якості, що залежить від двох і більше показників якості; для суперечливих показників оптимум буває звичайно компромісним рішенням між двома показниками якості;
- 11) наближено у квадратурах або точно у числовому вигляді розв'язується спрощена задача оптимізації системи;
- 12) аналізується оптимальний розв'язок спрощеної задачі, для чого варіюються початкові дані у реальних межах;
- 13) відображаються «криві обміну» [10, 11] у вигляді графіків або таблиць;
- 14) визначаються закономірності оптимальних показників та оптимального розв'язку, які для аналізу їх якостей краще мати у квадратурах (у вигляді формул);
- 15) додається черговий за значущістю показник якості і робляться спроби для застосування отриманого розв'язку спрощеної задачі для оптимізації ТС при розширеній постановці задачі;
- 16) дії, якщо можна, повторюються до прийнятної адекватності опису системи;

17) виробляється, якщо можна, уніфікована **система автоматизованого проектування (САПР)** системи, об'єкта, процесу;

18) вихідні дані до задач періодично уточнюються аналогічно стандартам з появою нових технологій, елементів, принципів побудови, нових законів природи і т. ін.;

19) тому розв'язання задач також необхідно уніфікувати і стандартизувати для використання у САПР.

Якщо визначити показники якості та їх залежності від технічних параметрів не вдається, то все рівно задачі ставляться та розв'язуються інтуїтивно, але також за даним, спрощеним сценарієм. Інтуїтивні розв'язання також хороші, якщо нема інших при об'єктивних даних і розв'язаннях.

Спрощений сценарій розгляду складних проблем може виглядати таким чином:

1. Згідно з викладеними принципами розглядаєте свою проблему;

2. Вводите свої цінності, тобто показники якості, і залишаєте з них лише важливі і суперечливі показники;

3. Якщо велика складність – якщо можна, спрощуєте;

4. Відчувши інтуїтивно суперечливість впливу факторів на показник, берете дві крайності розміру фактора: 1) коли якогось фактора багато, то показник гірше з однієї причини; 2) коли того ж фактора замало, тоді показник також гірше, але з іншої причини. Тут відчувається інтуїтивний оптимум при виборі розміру фактора, що впливає.

Нагадаємо, що визначення оптимуму інтуїтивним шляхом називається «почуттям міри»;

5. Послідовно ускладнюєте ваші міркування.

Таким чином, викладені принципи можуть бути використані не тільки у наукових дослідженнях.

Актуальністю напряду або теми називається такий критерій для оцінки їх потрібності, що визначається наявністю і значущістю таких показників, як **новизна, корисність і своєчасність.**

1.5. Прийняття рішення в умовах невизначеності

Невизначеність у задачах буває таких типів:

- 1) відомий закон розподілу випадкової величини;
- 2) невідомий закон розподілу, але є статистика;
- 3) відомий закон розподілу випадкової величини, але невідомі параметри розподілу (параметрична невизначеність);
- 4) нема або невідомий закон розподілу величини – **нечіткої множини** [38], оскільки **випадковою такою величиною назвати не можна**, тому що **немає числових характеристик розподілу і ніякої стійкої закономірності** у їх появі.

Стосовно пп. 1, 2, якщо хоча б один технічний параметр або показник якості – випадкова величина, то загальноприйнятний метод розв'язання таких задач – **замість випадкової величини використовувати її математичне сподівання**. Це природно, оскільки математичне сподівання чи середньоарифметичне значення випадкової величини – це точкова, не випадкова, найбільш стійка чи найбільш імовірна оцінка. Далі необхідно оцінювати також довіру до результату досліджень.

Стосовно п. 3 існують складні непараметричні методи оптимізації систем.

Якщо величина належить нечіткій множині (п. 4), то щодо цього випадку існують розробки дослідника Заде [38], що використовують евристичні функції належності нечіткій множині. Це теж інформація, якщо немає більш чітких уявлень. Найбільш поширений **приклад нечітких множин** – це **маркетингова вартість**, або **ціна систем** та їх елементів. Метод боротьби з нечіткістю ціни, тобто метод обробки вартісної статистики для **перетворення нечіткої величини вартості у випадкову величину** і використання її у задачах оптимізації систем викладений також у роботі [38].

Крім викладеного, відомий також принцип урахування в задачах оптимізації випадкових і нечітких величин з повною невизначеністю. Це **принцип урахування невизначеності для гіршого фіксованого випадку**. Наприклад, енергетичний потенціал розраховують для гіршого випадку – для максимальної віддаленості радіолінії, надійності системи – для гірших умов застосування і т. ін.

Згідно з викладеними принципами можна сформулювати також «**принцип гіпотези**», тобто отримання нових знань або відомостей в умовах значної невизначеності.

На основі відомих фактів, відомостей, законів природи висувається, спочатку як попередня, **робоча гіпотеза або передбачення**. Оцінюється її достовірність. Якщо достовірність не досягає потрібного значення, висувається інша гіпотеза і т. ін. У результаті залишається найбільш достовірна гіпотеза.

Контрольні питання

1. Яке призначення САПР ТС?
2. Які головні принципи розв'язання задач та проблем?
3. У чому полягають труднощі теорії ІВРТС?
4. Чи покращуються результати оптимізації ІВРТС при збільшенні числа обмежень?
5. Що таке показник якості?
6. Що таке критерій якості?
7. Який критерій якості ІВРТС найбільш об'єктивний і необмежений в області визначення?
8. Які недоліки умовного критерію якості?
9. Що таке подвійність задач оптимізації за умовним критерієм якості?
10. Які умови інваріантності розв'язання задач оптимізації стосовно різних постановок задач?
11. Що таке модель системи, об'єкта, процесу?
12. Що таке адекватність моделі ?

2. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ІВРТС

Далі викладений сучасний стан проблеми оптимізації інформаційно-вимірjuвальних радіотехнічних систем (ІВРТС) за багатьма показниками якості, поняття про умовний показник якості ІВРТС.

2.1. Сучасний стан проблеми оптимізації ІВРТС за багатьма показниками якості

Розглянутий метод отримання програмного продукту, призначеного для програмного опису оптимізації ІВРТС [31, 36, 38]. Приклад оптимізації ІВРТС вибраний не випадково. Це більш складна система, яка використовує випадкові процеси, широкосмугові, шумоподібні сигнали й електромагнітні поля. Такий опис завжди можна спростити.

Радіотехнічні системи завжди описуються значним числом показників якості. При цьому залишаються незалежні показники, які як правило, суперечливі. Це означає, що якщо при проектуванні РТС ми використовували один показник якості і прийняли рішення про технічні параметри, сигнали і структури системи, то, вводячи додатково потрібні показники якості, ми вводимо по суті додаткові обмеження на перший показник.

Тому, щоб хоч як-небудь зменшити втрати від погіршення першого показника якості, потрібно його оптимізувати. Слід зазначити, що вже зараз замовник системи не допустить, щоб система була неоптимальною.

Саме постановка та розв'язання таких задач для ескізного проектування ІВРТС і є поки найбільшою складністю. Ще знедавна це вважалося взагалі неможливим, якщо враховувати всі показники якості системи. Досягнення в галузі синтезу РТС і складних систем за сукупністю показників якості опубліковані в [9 - 11, 18, 21, 22, 27, 29, 31, 35, 36, 38].

Далі буде показано, що синтез параметрів може бути уніфікованим як для інформаційних та інформаційно-вимірювальних, так і для вимірювальних систем, у тому числі РТС.

У роботах [10, 11 та ін.] викладені, з одного боку, достатньо загальні методи оптимізації систем, з другого – подані окремі приклади оптимізації за двома-трьома показниками якості, що не дозволяють з єдиних позицій, одним математичним апаратом проводити оптимізацію РТС за значним числом змінних і показників якості.

Ці та інші відомі роботи про синтез сигналів, структури вимірників і технічних параметрів є частковими та обмеженими

чи занадто абстрактними, щоб їх використовувати, і не дають відповіді на питання про можливість загального оптимального синтезу РТС, про взаємозв'язок видів синтезу, про єдину ідеологію вимірювань і т. ін.

Питання про склад показників якості і параметри системи виникати не повинні. По-перше, кращого обґрунтування складу показників якості ІВРТС, ніж це зроблено в ТТВ до реальної системи, навряд чи можна очікувати. Запропонований метод синтезу ІВРТС дозволяє виключити ранжування показників якості, оскільки використовує рівноправні, а не лексикографічні [10, 11] критерії якості. По-друге, методи розв'язання у принципі дозволяють урахувати майже всі основні технічні параметри системи, тому їх склад також не потребує спеціального обґрунтування.

При виборі класу сигналів, якщо врахувати сучасні вимоги до них за змістом робіт [10, 11], слід віддати перевагу широкосмуговим сигналам, що забезпечують підвищену завадостійкість по відношенню до вузькосмугової чи до імпульсної завади, допускають сигнальне та апаратурне суміщення і створення значних ансамблів сигналів з хорошими взаємодіючими якостями при передачі інформації.

Оптимальний вибір структур вимірювальних каналів за заданими ТТВ вже не являє собою складну проблему, оскільки вже ясно, як його треба виконувати [2].

У роботах [31, 36, 38] викладений загальний синтез параметрів чи оптимізація ІВРТС на множині технічних параметрів за списком основних показників з ТТВ, принципи побудови вимірювальних каналів та сигналів.

Однак загального синтезу ІВРТС на трьох множинах до цього часу нема з таких причин:

- синтез параметрів не є загальним для всієї ІВРТС, хоч і охоплює значну її частину;
- існує проблема багатовимірності;
- існує проблема багатокритерійності, тобто проблема великого списку ТТВ;
- існує проблема використання нечітких множин витратних показників;

- не існує загального синтезу сигналів за багатьма ТТВ;
- не існує уніфікованих задач оптимізації структур ІВРТС різних призначень.

Для вимірювальних систем або каналів вирішена ціла низка проблем, необхідних для синтезу ІВРТС за ТТВ на трьох множинах [38]:

- 1) існуючі теорії радіовимірів не завжди чітко використовують фізичне трактування вимірів;
- 2) синтезу параметрів систем за заданими ТТВ раніше не було, тому що нема повної бази даних;
- 3) не було повної класифікації реальних вимірників і методів оцінювання параметрів сигналу, не було загальної системної оцінки ефективності багатоетапних та багатоскальованих вимірників;
- 4) існуючий синтез сигналів носить до цього часу в значній мірі евристичний характер.

Елементи параметричного синтезу існували у вигляді часткових задач прийняття оптимальних рішень про технічні параметри за критеріями завадостійкості [11], максимуму енергетичного потенціалу [27] при обмежених асигнуваннях.

До основних причин відсутності рішення проблеми оптимального синтезу ІВРТС на множинах технічних параметрів, сигналів і структур можна віднести таке:

- 1) складність проблеми, різноманітність і маловивченість зв'язків технічних параметрів з показниками якості ІВРТС;
- 2) нерозробленість єдиних достатньо простих методик постановок та розв'язання задач синтезу технічних параметрів ІВРТС за багатьма критеріями якості для великої розмірності задач, тобто для великого числа параметрів;
- 3) неповнота, нечіткість (відсутність закону розподілу величини) і нестабільність техніко-економічних, масогабаритних та інших даних про показники якості ІВРТС.

Характеристика вказаних причин

Складність вирішення проблеми полягає у багатофункціональності систем і багатокритерійності їх опису. Зв'язок показників якості з технічними параметрами достатньо

вивчений для систем зв'язку [1, 11, 21, 22, 26, 27], у меншій мірі – для ІВРТС, особливо – для суміщених систем.

Не дивлячись на добре розвинуті і відомі [7, 8, 13, 22, 27, 30, 38] методи аналізу різних факторів, що впливають на якість передачі сигналів у радіолінії, ще недостатньо вивченими є багатofакторні процеси обробки сигналів, особливо складних.

Потрібність синтезу високоякісних систем може, як не дивно, суттєво спростити постановку та розв'язання задачі оптимізації. Тоді система працює з великим відношенням сигнал/завада, що, по-перше, дозволяє порівняно просто врахувати вихідний ефект у вигляді співмножників і оцінити точність його подання у показниках якості і, по-друге, дозволяє вважати достатньо стійкими числові характеристики (моменти) розподілу випадкових процесів, які у ряді випадків описують міру відповідної якості ІВРТС.

Таким чином, а також завдяки використанню сучасних відомих подань і готових результатів [30, 38] та ін., вдається спростити постановку відповідної задачі загального синтезу, що є задачею стохастичного програмування [14]. (Це така задача математичного програмування, де є хоча б один випадковий показник або параметр).

Упевненість у стійкості розв'язання цієї задачі більше впливає з фізичної її постановки, ніж з розв'язання її класичними методами.

Отже, складність вирішення проблеми безпосередньо залежить також від числа і багатоваріантності подання показників якості і їх розмірності («прокляття багатовимірності»). Це є підставою і другою причиною відсутності рішення проблеми загального синтезу ІВРТС.

Оскільки не існує універсальних методів пошуку оптимального рішення у математичному програмуванні, то при класичному підході до вирішення проблеми не може бути єдиної методики оптимізації ІВРТС за сукупністю показників якості, що лягла б в основу теорії такої оптимізації ІВРТС.

Виникає дилема: чи точно розв'язувати кожний раз конкретну часткову багаторозмірну задачу математичного програмування на умовний екстремум, у числовому вигляді, за великий інтервал часу і ще з не зовсім точними вихідними

даними, чи застосовувати спрощення та універсалізацію постановки задачі за рахунок використання особливостей показників якостей, що дуже важливо для САПР.

Останнє дозволяє істотно скоротити час розв'язання, автоматизувати проектування систем і для простих типів обмежень отримати рішення в аналітичному вигляді, а отже, отримати хорошу можливість аналізу. Такий шлях передбачає:

1) приведення показників якості з обмежень до єдиної форми перетворенням координат, що для багатьох прикладних задач не є проблемою;

2) лінеаризацію цільової функції (при застосуванні методу у подальшому можна використовувати квадратичні форми, гесіан і т. п.);

3) аналітичне рішення отриманої таким чином задачі виродженого динамічного (або блокового) програмування або застосування розв'язку з парку відомих задач [14];

4) використання при необхідності розв'язання такої спрощеної задачі ітераційної формули з необхідною близькістю до попереднього розв'язку.

Одна з причин відсутності рішення проблеми синтезу ІВРТС обумовлена специфікою розвитку радіотехніки, спрямованої на покращення так званих основних показників якості (завадозахищеності, точності та ін.), і невикористанням питань урахування техніко-економічних та масо-технічних даних. Запропонований тут шлях вирішення проблеми синтезу ІВРТС органічно враховує цю особливість статистичних даних.

Характеристику причин відсутності рішення проблеми загального синтезу ІВРТС слід доповнити також проблемами гносеологічного типу. Якою повинна бути задача загального синтезу? Лексикографічною з елементами евристики при ранжуванні показників якості, при послідовних поступках і т. п.? За зваженим критерієм з евристичними коефіцієнтами? За відносним критерієм з обмеженою областю визначення функціонала? Де знайти для ІВРТС узагальнений критерій якості чи функцію корисності? Яка порівняльна ефективність згаданих постановок задач? І взагалі, що таке «ефективність»?

Суворих вказівок щодо цього поки нема, однак тут, і в [36, 38], вміщується ряд таких відповідей. Як буде викладено далі, оптимізація за умовним критерієм якості вміщує менше за все інтуїтивних припущень (що вносяться, як і всюди, тільки при відборі показників якості), а складність проблеми пропонується долати вищезгаданим шляхом.

2.2. Ефективність складних інформаційно-вимірювальних систем

Поняття «ефективності систем» у цей час визначають по-різному.

Однак під ефективністю оптимізованої системи слід розуміти ступінь покращення узагальненого показника якості у порівнянні з існуючими.

Під ефективністю використання реальної системи слід розуміти ступінь наближення узагальненого показника якості (або характеристик) системи до можливих оптимальних значень.

Оскільки якість інформаційно-вимірювальних, у тому числі радіотехнічних, систем описується сукупністю показників якості та обмеженнями на ресурси, за умовами роботи і т. ін. Виникає питання про те, як у цих непевних умовах визначати найкращу ефективність систем і відповідне оптимальне рішення про її параметри, структуру і сигнали.

Для класичного вирішення задач слід вибирати як найбільш значущі показники не лексикографічні критерії якості, а вектор \bar{D} рівноцінних показників якості системи.

Таким чином, інформаційно-вимірювальні системи можуть описуватися нижченаведеними показниками якості.

1. Завадостійкість передачі інформації прямого та зворотного каналів.
2. Точність вимірювань параметрів сигналу або руху об'єкта.
3. Швидкість передачі інформації.
4. Вартість системи, або економічність.

5. Надійність функціонування.
6. Електромагнітна сумісність.
7. Точність звіряння часу і прив'язки шкал.
8. Пропускна спроможність ІВРТС.
9. Живучість.
10. Час вимірювань і передачі інформації.
11. Завадозахищеність.
12. Вага апаратури та її складових частин, особливо для бортових систем.
13. Обсяг апаратури і її складових частин.
14. Інші показники якості.

Для постановки задачі оптимізації на етапі системного аналізу необхідно визначити залежність показників якості $\vec{D}(\vec{X})$ від вектора технічних параметрів.

Якщо відома функція (функціонал) мети $f(\vec{D}(\vec{X}))$, то найкращою буде система з такими оптимальними технічними параметрами \vec{X}_0 , при яких досягається $\text{extr}_{\{\vec{X}\}} f(\vec{D}(\vec{X}))$ на множині $\{\vec{X}\}$:

$$\text{extr}_{\{\vec{X}\}} f(\vec{D}(\vec{X})) = f(\vec{D}(\vec{X}_0)).$$

Функціонал $f(\vec{D}(\vec{X}))$ звичайно виступає у ролі ймовірності досягнення мети $P_{\text{ц}} = P_{\text{ц}}(\vec{D}(\vec{X}))$. Однак найчастіше у складних системах функціонал $f(\vec{D}(\vec{X}))$ визначити не вдається.

У цих умовах використовується один з указаних раніше критеріїв оптимальності.

Якщо розв'язання задач на умовний екстремум не залежить від того, яку функцію візьмемо як функцію мети (при будь-якій постановці задачі), тобто якщо рішення збігаються, то ця якість називається інваріантністю розв'язання до постановки задачі на умовний екстремум.

Умовний критерій не має вказаних раніше недоліків, однак йому належить складність розв'язання задач і можливість відсутності інваріантності розв'язку у постановці задачі. Складність розв'язку спеціальних задач можливо обійти [36, 38].

І для більшості реальних задач, де потрібен синтез високоякісних систем і де залежності $D_i(\bar{X})$ є монотонними, інваріантність розв'язку зберігається.

Якщо якість інваріантності розв'язку до постановки задачі на умовний екстремум виконується, то для порівняння ефективності систем можна вибирати як цільову функцію (функцію мети) будь-який показник якості.

Задачі на умовний екстремум мають такі методи розв'язання:

1) найбільш розповсюджений, і часто єдиний, метод множників Лагранжа;

2) метод підстановки параметрів із функцій зв'язку (з обмежень), що перетворює задачу на умовний екстремум у задачу на безумовний екстремум;

3) метод математичної індукції, якщо дозволяє вид задачі;

4) метод геометричного програмування для ряду сепарабельних задач.

Такі задачі називають також синтезом параметрів систем. Однак їх слід розв'язувати на всій дискретній множині структур і на множині сигналів.

Контрольні питання

1. Охарактеризувати сучасний стан математичного забезпечення задач оптимізації реальних систем зв'язку.

2. Описати основні проблеми оптимізації сучасних ІВРТС.

3. Які шляхи для подолання проблем оптимізації реальних систем?

4. Що таке «умовний» критерій якості ІВРТС?

5. Що таке показник якості систем?

6. Переваги та недоліки ІВРТС.

7. Які показники якості можуть використовуватися для оптимізації ІВРТС?

3. ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У даному розділі містяться відповіді на такі питання:

- який критерій оптимальності і який склад показників якості слід використовувати при оптимальній побудові ІВРТС;
- як визначити оптимальні технічні параметри і що робити із сигналами та вимірювальними структурами;
- які розглядати ефекти обробки сигналу;
- як урахувати параметри ефектів і системи при оптимізації;
- за якими формулами розраховувати оптимальні параметри;
- який вигаш при цьому слід очікувати й т. д.

Викладені методи оптимізації, розрахункові співвідношення й алгоритми дозволяють одержати оптимальні параметри ІВРТС на етапі ескізного проектування. Отримані рішення про оптимальні технічні параметри, сигнали й про вимірювальні структури повинні служити вихідними даними для схемного проектування функціональних елементів, підсистем і вузлів ІВРТС.

3.1. Показники якості радіотехнічних систем

У попередньому розділі показано, що найбільш об'єктивним критерієм оптимальності можна вважати умовний критерій якості, що враховує сукупність показників якості, поданих у тактико-технічних вимогах (ТТВ).

При оптимізації РТС на етапі проектування, а також для оцінки зазначених показників якості зручніше виражати їх у конкретній числовій формі у вигляді вектора, що досить повно описує якість виконання основних функцій. Вектор наведених вище якісних показників можна використати для оптимізації будь-яких РТС. Показники якості є взаємозалежними й взаємообумовленими. Тому більш повний їх облік приводить прийнятну модель системи в більшу відповідність до реальної РТС. У цьому світлі розв'язання задачі оптимізації за одним із зазначених критеріїв рівноцінно глобальному розв'язанню при фіксованих значеннях інших незалежних показників якості.

Далі наведений метод розв'язання задачі оптимізації однопараметричної вимірювальної системи за критерієм мінімуму похибки вимірювань параметра руху об'єкта при обмежених асигнуваннях на систему.

Задачі носять типовий характер. Аналогічно формулюються будь-які задачі однопараметричних систем, або систем одного призначення, де не потрібно мати суміщених частин систем.

З урахуванням показника вартості, що робить оптимальну систему адекватною реальній системі, ідею оптимізації у спрощеному вигляді можна викласти класичним способом.

Звичайно передбачається, що є кореляція або функціональна залежність між основними технічними параметрами й вартістю системи [19, 21, 26, 27, 37]. Тобто при покращенні якості системи її вартість монотонно збільшується.

Наприклад, при збільшенні потужності або при зменшенні нестабільності частоти генераторів вартість системи зростає.

Інший приклад: помилка передачі інформації або вимірювань параметрів руху залежить від відношення сигнал/шум на виході каналів. У свою чергу відношення сигнал/шум залежить від таких технічних параметрів, як потужність передавача, коефіцієнт підсилення антени, коефіцієнт шуму приймача й т. д.

Якщо для системи використати граничні, найкращі, технічно реалізовані значення всіх параметрів, то вартість такої системи буде надзвичайно велика і для простих застосувань, де це не потрібно, навряд чи виправдано.

До показників якості РТС, що працюють на малих відстанях, не ставлять високих вимог, оскільки реалізація граничних значень параметрів являє собою науково-технічне досягнення й вимагає найвищих і тому невиправданих асигнувань.

Навіть при слабких вимогах до показників якості системи далеко не однаково, які технічні показники вибирати.

Наприклад, маємо один фактор – енергетичний потенціал, що залежить від добутку потужності передавача на коефіцієнт направленої дії (КНД) антени й інший фактор – сума асигнувань на ці функціональні елементи.

Тоді, якщо взяти гранично можливий коефіцієнт підсилення антени, то це потребує майже всіх асигнувань на антену. Але тоді на передавач практично не залишається асигнувань. Енергетичний потенціал буде майже нуль.

Візьмемо іншу крайність: усі асигнування витрачаємо на передавач. Тоді на антену асигнувань не залишається або майже не залишається. КНД буде дуже малий. Енергетичний потенціал також буде майже нуль.

Отже, очевидно, що існують такі (оптимальні) значення потужності передавача й КНД антени, при яких енергетичний потенціал стане найбільшим. І цей оптимум можна знайти строго математично або інтуїтивно.

У цьому головна ідея **оптимального розподілу ресурсів**.

Ресурсами можуть бути: інтервал часу, діапазон частот, витратні матеріали, кількість робітників або обладнання, асигнування на вироби або вартість та ін. Показник ціни виробів при ринковій економіці, як правило, носить випадковий характер, але не має закону розподілу. Тому закупівельна ціна комплектуючих виробів для системи є нечіткою множиною, з якою незручно працювати при оптимізації систем. А для адекватності моделі ефективності цей показник необхідний. Ця обставина стала основною причиною того, що є незначне число поставлених і розв'язаних задач з урахуванням цього показника.

3.2. Вартість блоків системи як обмеження на відповідні технічні параметри

В умовах обмеженості асигнувань на створення цієї системи велике значення має оптимальний розподіл фінансових засобів, відпущених на створення РТС, що забезпечує найвищу якість систем при заданих витратах.

Основні властивості вартості системи і її функціональних елементів (ФЕ) полягають у тому, що:

1) вартість виробу визначається необхідним робочим часом, способом його виготовлення, обладнанням, кваліфікацією працівника, кількістю і якістю витратних матеріалів;

2) тому вартість визначає в значній мірі технологічність виробу;

3) вартість залежить також від загального часу серійного виробництва, від номера серії, року випуску й т. д.;

4) кожен функціональний елемент (ФЕ) і кожна система має вартість;

5) вартість має властивість адитивності, тобто вартість системи складається із доданих вартостей ФЕ;

6) вартість залежить від часу, але її завжди можна перерахувати до одного часу з якоюсь точністю;

7) вартість у формі ціни – це нечітка множина, оскільки для ринкової ціни неможливо мати закон розподілу ймовірності.

Остання властивість нечіткості є істотним недоліком, з яким можна боротися двома шляхами: 1) використати теорію роботи з нечіткими множинами за методом Заде [37, 38]; 2) використати наведений далі метод перетворення нечіткої множини ціни у випадкову величину, що має математичне сподівання й дисперсію. Краще використовувати другий шлях.

Як показано в літературі [19-22, 27, 37, 38], між параметрами системи і її вартістю існує висока кореляція або навіть публікуються [26] відомі функціональні залежності. Але для використання цього замало. Тому що неясно, як залежність була отримана.

Це дає підстави встановити характер залежності технічних параметрів системи від її вартості як обмеження і шукати глобальний екстремум цільової функції. Правда, при цьому точність таких залежностей не встановлена.

Якщо таких залежностей немає для кожного технічного параметра ФЕ, то їх можна одержати за техніко-економічною статистикою, наприклад, за відомими прайс-листами маркетингових фірм, що продають комплектуючі функціональні елементи. Ці дані підлягають обробці з використанням **методу перетворення нечітких множин вартості у випадкову величину** [37, 38].

Алгоритм перетворення наведений далі.

1. Для систем певного призначення збирається маркетингова статистика для її ФЕ.

2. Здійснюється монотонне перетворення технічного параметра в таку величину – його функцію від цього параметра, або фазовий параметр, так що, чим він менше, тим краще. Наприклад, для потужності передавача можна взяти величину, обернено пропорційну потужності, таку, що чим вона менше, тим краще для системи.

3. Для кожного ФЕ на площині: ціна – технічний параметр або його перетворення, відзначаються або нумеруються, якщо можна, точки, що відповідають ФЕ систем аналогічного призначення.

4. Оскільки, чим менше перетворена величина або сам параметр, тим краще для системи, а також чим менша вартість, тим краще, то доцільно вибирати лише ті ФЕ, які ближче до осей. Чому не до початку координат? Тому що поки невідомо, які будуть оптимальні параметри до розв'язання задачі, та не ясно, які залишати кращі значення параметрів в усьому їх діапазоні.

5. При такому відборі відбраковуються ФЕ зі спекулятивними цінами, а також ФЕ, що не відповідають заданим вимогам за ціною.

6. ФЕ із заниженими цінами також можуть відбраковуватися, якщо це демпінгові ціни.

7. Статистика, що залишилася, згладжується методом найменших квадратів і використовується в задачах оптимізації у вигляді ліній середньоквадратичної регресії вартості на параметр.

Якщо ФЕ визначається декількома технічними параметрами, то по черзі визначаються залежності регресії ціни на один з параметрів при фіксованих значеннях інших параметрів.

На рис. 3.1 зображена умовна техніко-економічна статистика розподілу функціональних елементів передавачів на площині вартість – фазовий параметр за результатами опитування прайс-листів фірм, зазначених праворуч.

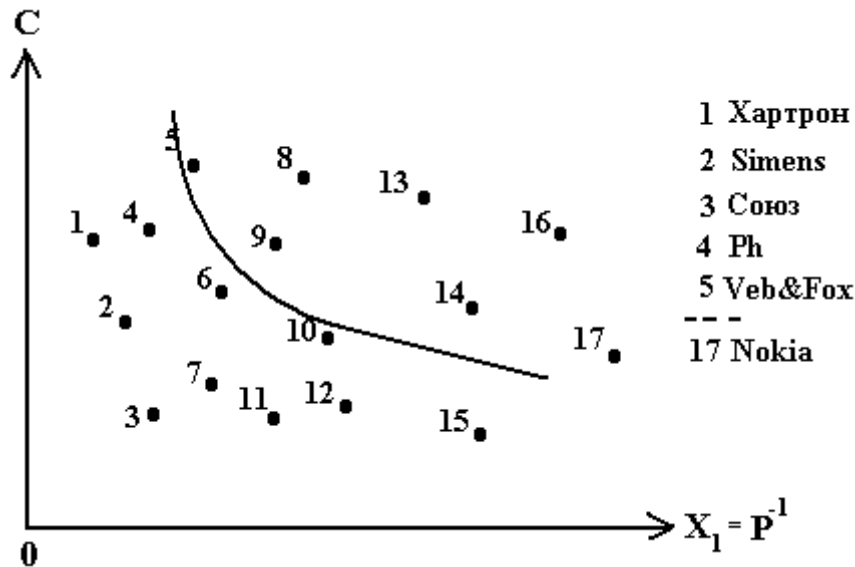


Рис. 3.1

Фазові параметри за визначенням повинні бути такими, що чим вони менші, тим краще для системи. Але через те, що до розв'язання задачі оптимізації невідомо, які фазові параметри будуть оптимальні, то чим ближче вони до осей координат, тим краще для системи. Звідси випливає, що, якщо параметр ФЕ знаходиться вище й правіше, його варто відбракувати через непридатність для нашої задачі, хоч якість їх хороша. Непридатність може бути через спекулятивну ціну або є більша залежність від іншого параметра цього ж ФЕ.

Дану лінію можна взяти ближче до початку координат. Але при цьому «бідніше» статистика й менш надійний результат згладжування.

Інші дані згладжуються методом найменших квадратів.

Використовуючи відомі залежності відношень сигнал/шум від технічних параметрів, для яких отримані лінії регресії, або залежності вартості від технічних параметрів, можна поставити задачу параметричного синтезу ІВРТС, що вимірює параметр руху або передає інформацію.

Технічні параметри ІВРТС, для яких немає таких залежностей, фіксуються й не беруть участі в оптимізації.

Задачу можна поставити й для дискретних даних про ціни. Це буде задача дискретного програмування. Але при великому обсязі статистики час її розв'язання може бути неприпустимо великим.

Наприклад, при числі реалізацій i -го параметра m_i і числі параметрів N_c системи кількість обчислень цільової функції при заданих значеннях параметрів і кількість порівнянь енергетичного потенціалу за величиною дорівнює $M = \prod_{i=1}^{N_c} m_i$.

Наприклад, при $m_i = m > 10$ і $N_c > 20$ число $M > 10^{20}$. Якщо час рахунку цільової функції дорівнює 1 мкс, то необхідність обчислень відпадає, тому що потрібно кілька років безперервного рахунку.

Тому подання обмежень за вартістю на параметри у вигляді безперервних функцій середньоквадратичної регресії є найкращим у цих умовах способом формалізації задачі, що має, крім того, ряд переваг.

Вартість у процесі оптимізації системи є багатовимірною функцією регресії всіх фазових параметрів, які характеризують технічні параметри блоків системи й інші параметри збудження, розстроювання, неідеальності, тобто вартість являє собою вибіркове математичне сподівання ансамблю вартостей при фіксованих значеннях фазових параметрів і мінімальних середньоквадратичних відхиленнях.

3.3. Структура оптимізованої системи й позначення її технічних параметрів

Оптимізація параметрів ІВРТС при відомій структурі може бути за умовним критерієм завадостійкості або точності вимірювань параметрів сигналу при обмеженнях на асигнування чи за умовним критерієм максимуму відношення сигнал/шум при обмеженнях на асигнування. Другий шлях більш загальний і зручний для САПР, однак при цьому частина апаратури і частина функцій системи спочатку може не брати участі в оптимізації. Цей недолік заповнюється при оптимізації ІВРТС поетапно при блоковому програмуванні.

Узагальнена структура радіолінії в основному відома. Однак структура вимірювальних та інформаційних каналів залежить також від методу вимірювань або передачі параметрів сигналу.

При виборі структури оптимізованої системи для вимірювань радіальної швидкості рухомих об'єктів можна користуватися результатами інженерного синтезу систем, отриманих, наприклад, методом евристичних рішень, що містять у собі досвід минулого, який, на жаль, не завжди дозволяє досягти оптимальності.

Синтез системи, наприклад, передбачається при відомій структурі (рис. 3.2) з простим дискримінаційним вимірником частоти Доплера або швидкості об'єкта.

Знайдені в результаті рішення параметри повинні бути вихідними даними для детального розроблення принципової схеми блоків або для вибору при проектуванні стандартних блоків з оптимальними параметрами.

Назвемо й позначимо основні параметри системи, які наявні в цільовій функції й за якими буде здійснюватись оптимізація.

Кожна антена (це A_1 і A_2 – приймальна й передавальна наземні, A_3 і A_4 – приймальна і передавальна бортові) може описуватися такими параметрами: коефіцієнтом спрямованої дії G_{1-4} ; коефіцієнтом корисної дії η_{1-4} ; точністю виготовлення антен – коефіцієнтом J_{1-4} , що визначає величину фазових помилок Ψ_i у розкритті антени; шириною діаграм спрямованості у двох площинах $\Delta\theta_{1i}$ і $\Delta\theta_{2i}$; втратами коефіцієнта спрямованої дії за рахунок впливу землі на діаграму спрямованості L_{x1-4} і впливу корпусу рухомого об'єкта на діаграму спрямованості L_{x3-4} ; втратами посилення антени за рахунок непогодженості поляризації $\chi_{1,2}$; шумовою температурою антени T_{oa} тощо.

Система автосупроводження по кутах визначається дисперсією похибки D_{1-4} , втратами посилення антен за рахунок нестабільностей утримання кутів $G_{n1,4}$. Фідерні пристрої визначаються коефіцієнтом загасання L_3 і коефіцієнтом хвилі, що біжить, L_{1-41-4} .

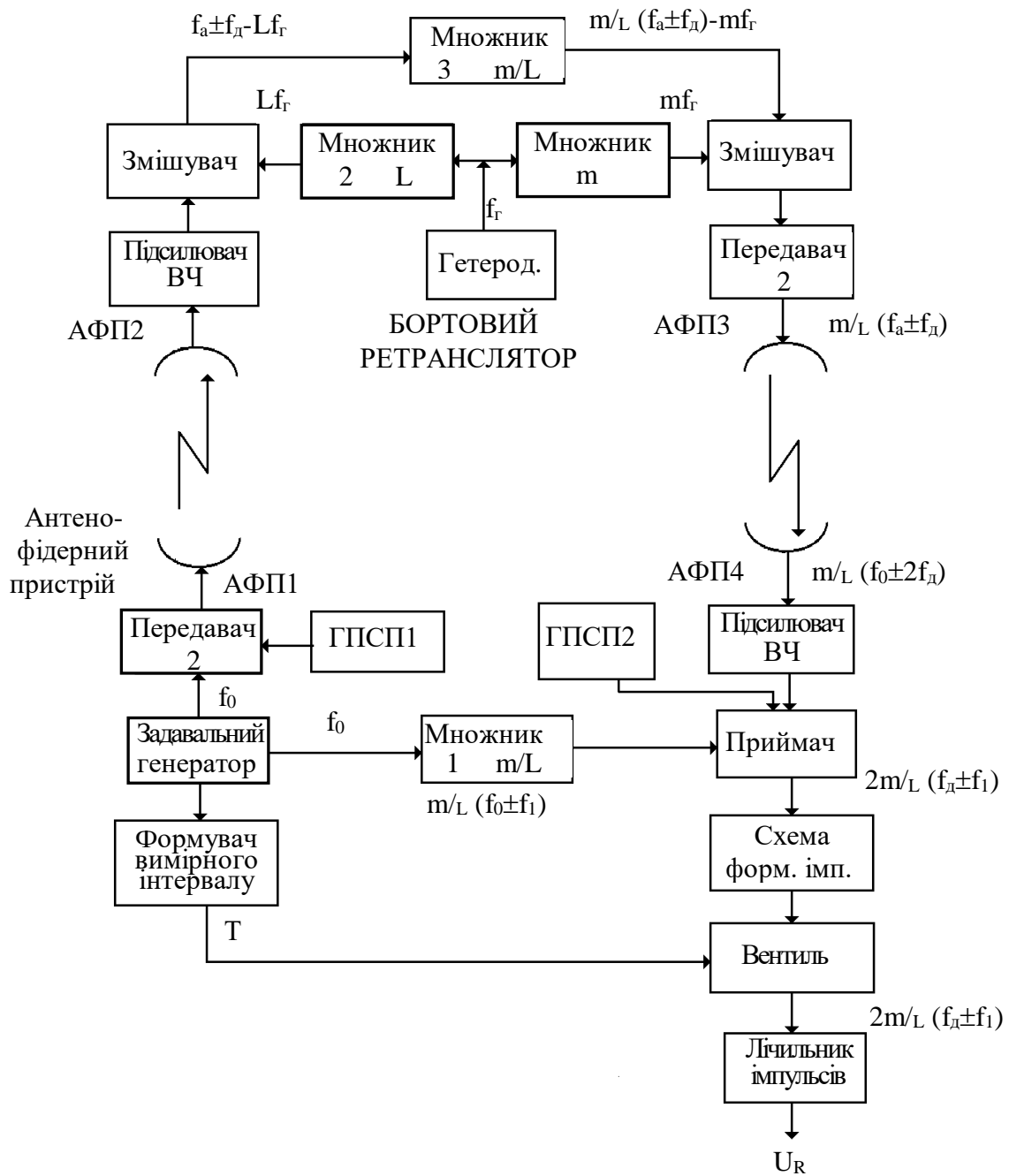


Рис. 3.2

Підсилювачі високої частоти УВЧ1 й УВЧ2 приймачів визначаються смугою пропускання $P_{увч}$, коефіцієнтом підсилення $K_{увч}$ за потужністю, коефіцієнтом шуму $Ш_{увч}$.

Змішувачі СМ1-3 можуть описуватися коефіцієнтом перетворення (або передачі за потужністю або за напругою) $L_{прі}$ і коефіцієнтом шуму $Ш_{пері}$.

Множники описуються коефіцієнтом передачі $L_{пері}$ і коефіцієнтом шуму $Ш_{пері}$.

Підсилювачі проміжних частот (ППЧ) визначаються смугою пропускання $P_{упч1,2}$, коефіцієнтом підсилення $K_{упч1,2}$, втратами обробки за рахунок дрейфу посилення частоти, що позначається коефіцієнтом $L_{д1,2}$; фазова система автопідстроювання частоти визначається результуючою смугою в режимі супроводу за частотою, у тому числі смугою фільтра нижніх частот $P_{фнч}$, дисперсією похибки вимірювання $D_{вд}$, що служить у цій задачі цільовою функцією, дисперсією похибки за рахунок динамічного й іншого ефектів $\Delta R^{(k)}$, втратами післядетекторної обробки L_0 .

Канал синхронізації K_c може визначатися результуючою дисперсією похибки синхронізації δt . Задавальний генератор (ЗГ) являє собою стандарт частоти з розподільниками й помножувачами частоти, що визначається відносною нестабільністю частоти $\Delta f_{зг}/f_0$.

Гетеродини $Гет_{1-2}$ можуть визначатися результуючою нестабільністю частоти $\Delta f_{г}/f_0$.

Помножники частоти $M_{н1-4}$ визначаються коефіцієнтом шуму $Ш_{умн1-2}$ і коефіцієнтом множення m/l .

Модулятор визначається коефіцієнтом шуму $Ш_m$ при заданій вихідній потужності й коефіцієнті підсилення.

Передавачі ПРД₁₋₂ визначаються потужністю $P_{прд1-2}$, смугою пропускання $P_{прд1-2}$.

Таким чином, оптимізація системи (параметричний синтез) здійснюється за перерахованими й іншими параметрами, які є основними й необхідними для розв'язання поставленої задачі.

При цьому необхідно враховувати всі ті параметри, які вносять істотний вклад у похибку вимірювань радіальної швидкості. Якщо параметри впливають лише на відношення сигнал/шум на виході системи обробки, то оптимізація параметрів РТС стосується як слідкуючих, так і не слідкуючих вимірників параметрів руху та інформаційних каналів повною мірою.

3.4. Формалізація цільової функції в задачі оптимізації вимірювальної системи

Похибка вимірювань радіальної швидкості або іншого параметра рухомого об'єкта є одним з показників якості системи. Тому похибка синхронізації опорного й прийнятого сигналів розглядається як параметр, а не як критерій для оптимізації. Нехай борт об'єкта працює в режимі активної ретрансляції сигналу з переносом його широкосмугового спектра на іншу частоту, отриману дробово-раціональним перетворенням частоти $\left(\frac{1}{m}\right)$, як це робиться в реальних системах для розв'язки передавальних і приймальних каналів. Усе викладене придатне й для пасивної ретрансляції, де тимчасова розв'язка каналів здійснюється за рахунок запізнювання строба або опорного сигналу більш ніж на елемент.

Тоді при вимірюванні радіальної швидкості V_r запитувальним методом відносний доплерівський ефект не позначається, гравітаційна складова мала й вираз для V_r має вигляд

$$V_r = \left(\frac{1}{m}\right) \frac{f_d V_c}{2f_0},$$

де f_0 - несуча частота;

f_d - частота Доплера;

V_c - швидкість поширення радіохвиль;

l, m - коефіцієнт множення $f_{3Г}$.

Оскільки доданки незалежні, дисперсія $D\left[\frac{\Delta V_r}{V_r}\right]$ визначається

як

$$D\left[\frac{\Delta V_r}{V_r}\right] = \left(\frac{1}{m}\right)^2 \left(D\left[\frac{\Delta f_d}{f_d}\right] + D\left[\frac{\Delta f}{f_0}\right] + D\left[\frac{\Delta V_c}{V_c}\right] \right), \quad (3.1)$$

де $D\left[\frac{\Delta f_d}{f_d}\right] = \frac{D[\Delta f_d]}{f_d^2}$ - дисперсія відносної похибки вимірювання частоти Доплера;

$D\left[\frac{\Delta f}{f_0}\right]$ - дисперсія сумарної похибки за рахунок збудження, розстроювань, нестабільностей частоти й інших факторів, що дають прямий внесок у похибку вимірювань радіальної швидкості;

$D\left[\frac{\Delta V_c}{V_c}\right]$ - дисперсія відносної похибки за рахунок неточного знання умов поширення радіохвиль.

При цьому з рис. 3.2 видно, що

$$D\left[\frac{\Delta f}{f_0}\right] = \frac{\Delta f_{зг}^2}{f_0^2} + \frac{\Delta f_{пг}^2}{f_{пг}^2} + \sum_{i=1}^7 \frac{\Delta f_{умн i}^2}{f_0^2} + \frac{\Delta f_{сч}^2}{f_1^2} + \frac{\Delta f_{\delta}^2}{f_0^2} + \frac{\Delta f_{г}^2}{f_1^2}, \quad (3.2)$$

де $\Delta f_{зг}$ - нестабільність частоти задавального генератора;

$\Delta f_{пг}$ - нестабільність частоти перебудовувального генератора;

$\Delta f_{умн i}$ - приведена до f_0 нестабільність частоти помножників i перемножників;

$\frac{\Delta f_{сч}}{f_1}$ - відносна похибка лічильника;

$\frac{\Delta f_{\delta}}{f_0}$ - приведена до f_0 відносна нестабільність за рахунок інших блоків бортової й наземної апаратури, що включає невідомі систематичні похибки.

При визначенні дисперсії вимірювання частоти Доплера Δf_D нас буде цікавити оцінка розстроювання частоти ω_D при наявності випадкових і не випадкових параметрів; розстроювань, загасань і неідеальностей системи y_i .

За реалізацією $u(t)$ адитивної суміші сигналу $S(t)$ з гауссовим білим шумом $n(t)$ необхідно оцінити вимірювану частоту.

Таким чином,

$$u(t) = \mu S(t, \omega_D, \delta t, y_1, \dots, y_n) + n(t),$$

де μ - мультиплікативний множник.

Для реальних умов роботи вимірювальної системи з активною відповіддю статистичну модель ФМ ПСП сигналу можна описати реальною частиною виразу

$$S(t) = \mu S_0 1_T(t - \delta t) \sum_{k=1}^N u_{\tau} [t - (k-1)\tau_{\varepsilon} - \delta t] \cos[(\omega_0 - \omega_D)(t - \delta t) + a_k \pi + \psi_1]. \quad (3.3)$$

Квазіоптимальний приймач формує вихідний ефект (3.3) [25], однозначно пов'язаний з автокореляційною функцією сигналу.

Енергія сигналу з урахуванням (3.3) визначається як

$$\mathfrak{E}(f_D, \mu, \delta t) = \int_0^T S^2(t) dt = \frac{1}{2} \mu^2 S_0^2 T \phi_1(a), \quad (3.4)$$

де

$$\phi_1(a) = 1 - \frac{2}{a} + \frac{4}{a} e^{-a} - \frac{2}{a} e^{-2a}. \quad (3.5)$$

З огляду на (3.4) і (3.5), а також незалежність $\mu, \delta t, f_D$ вираз (3.4) можна подати у вигляді

$$\mathfrak{E}(\bar{X}) = \mathfrak{E}_0 \prod_i^{n_i} X_{\mathfrak{E}_i}, \quad (3.6)$$

де $X_{\mathfrak{E}_i} = X_{\mathfrak{E}_i}(y_i)$ - монотонні функції технічних параметрів y_i , що впливають на енергію сигналу й залежать від його обробки.

Звідси в припущенні, що апіорна щільність імовірності $P(f_d)$ (цілевказівки) розподілена рівномірно у великому діапазоні, що значно перевищує смугу ФАПЧ, дисперсія похибки вимірювання частоти Доплера f_d визначається [38] як

$$D[\Delta f_d] = \frac{2\beta_a^2 \sigma_a^2}{q} = \frac{1}{\prod_{i=1}^{n_i} X_i(y_i)}. \quad (3.7)$$

Таким чином, точність вимірювань частоти f_d реального приймача завжди гірше, ніж оптимального, за рахунок впливу численних факторів. Дійсно, навіть якщо приймач передбачає ідеальне усереднення за випадковими $\mu, \delta t, f_d$, завжди будуть існувати інші неідеальності схеми, конструкції й випадкові збурювання в блоках РТС, яких у реальних приймачах значно більше, ніж у прийнятій моделі.

Оскільки $D[\Delta f_d]$ є випадковою величиною, що залежить від випадкових μ і δt , то як цільову функцію для стохастичного програмування (3.7) можна прийняти лише у середньому, тобто використовуючи числові характеристики (перші початкові моменти) для μ і $|\delta t|$.

При цьому

$$\bar{\mu}^{\theta_i} = \prod_{i=1}^8 \overline{G_i^2(\theta_i)^{\theta_i}} = \prod_{i=1}^8 \frac{\alpha_i}{\alpha_i + 2} = \prod_{i=1}^8 X_{P_i}, \quad (3.8)$$

де X_{p_i} - «фазові» параметри, що являють собою монотонні функції від технічних параметрів y_i (у цьому випадку α_i) і впливають на потужність сигналу.

Співмножник

$$\left(1 - \frac{|\delta t|}{\tau_3}\right) = 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sigma}{\tau_3}$$

відбитий в (3.1) - (3.8).

Потужність сигналу P можна визначити з рівняння радіолокації з активною відповіддю:

$$P = \frac{P_{\text{прд1}} \lambda_{3-Б}^4 K_{\mu}}{(4\pi)^4 R^4} \frac{e^2}{m^2} \chi_1 \chi_2 \prod_{i=1}^4 (g_i \varepsilon_i L_{xi}), \quad (3.9)$$

$$\text{де } K = \prod_{i=1}^4 (L_{3i} L_{\delta vi}) K_{\text{увч1}} K_{\text{увч2}} K_{\text{прд1}} K_{\text{упч1}} K_{\text{упч2}} \prod_{i=1}^3 \alpha_{\text{смк}} L_0 L_{\partial p} L_{\partial 2} L_{\text{пер1}}.$$

Спектральна щільність вихідного шуму N_0 у припущенні, що на відстанях, більших 100 км, ретрансльований шум значно менше власного шуму наземного приймача, і що коефіцієнт підсилення підсилювача високої частоти $K_{\text{увч}} \gg 1$ визначається як (3.9), а спектральна щільність шуму як

$$N_0 = K_0 T (\text{Ш}_{\text{увч1}} - 1) K_{\text{увч1}} K_{\text{упч1}} L_{31} L_{\text{см1}} L_{\text{пер1}}, \quad (3.10)$$

де K_0 – постійна Больцмана.

З огляду на (3.8) - (3.10), дисперсію похибки вимірювань (3.7) можна підставити в повному вигляді

$$D[\Delta f_{\delta}] = \frac{6 \cdot 4^4 \pi^2 R_{\max}^4}{2\lambda_{3-6}^2 \lambda_{6-3}^2} \cdot \frac{K_0 T_{\text{сач}}}{T^3 P_{\text{прд1}} \prod_{i=1}^B \overline{G_i(\theta_i)} \chi_1 \chi_2 \prod_{k=1}^4 (g_k \varepsilon_k) [1 - \varphi(a)]} \times \quad (3.11)$$

$$\times \frac{\text{Ш}_{\text{увч1}}}{\left(1 - \frac{|\delta t|}{\tau_3}\right) f(\text{ТП}_{\text{фнч}}) \left(1 - \frac{\overline{\Psi}_0}{2}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\sigma}{\tau_3}\right) \prod_{\ell=2}^4 L_{3\ell} K_{\text{увч2}} L_{\text{см2}} L_{\text{см3}} K_{\text{прд2}} K_{\text{упч2}} L_0 L_{g1} L_{g2}}$$

Очевидно, що (3.11) можна записати простіше:

$$D[\Delta f_{\delta}] = \frac{\text{const}}{\prod_{j=1}^{n1} X_j},$$

де, як і колись, X_j – «фазові» параметри, тобто монотонні функції від своїх технічних параметрів, до числа яких відносяться також $1/\text{Ш}_{\text{увч1}}$ і $1/T_{\text{сач}}$,

$$\text{const} = \text{const}_1 \frac{R_{\max}^4}{\lambda_{3-6}^2 \lambda_{6-3}^2}.$$

При цьому

$$1 \geq X_{3j} \geq X_{3j\text{пре}},$$

де $X_{3j\text{пре}}$ - граничні значення параметрів, що описують неідеальності й розстроювання.

3.5. Постановка задачі оптимізації ІВРТС

Якщо, використовуючи наявну статистику, визначити, наприклад методом найменших квадратів, багатовимірну криву середньоквадратичної регресії

$$C = C(X_1, \dots, X_n), \quad (3.12)$$

то одержимо обмеження до цільової функції.

Тоді задачу можна сформулювати в загальних позначеннях:

$$\min D \left[\frac{\Delta V_r}{V_r} \right] = \min_{\left\{ \begin{array}{l} X_i \\ X_j \end{array} \right\}} \left\{ \frac{const}{\prod_{j=1}^{n_1} X_j} + \sum_{i=1}^{n_2} X_i^2 \right\} D_c, \quad (3.13)$$

при $C \leq C(X_1, \dots, X_n),$

$$X_{j\text{пред}} \geq X_j \geq 0,$$

$$X_i \geq X_{i\text{пред}} \quad 1 \geq X_{эj} \geq X_{эj\text{пред}}.$$

Таку задачу можна розв'язувати будь-яким відомим способом. Однак отриману систему функціональних рівнянь або зовсім не вдається розв'язати в аналітичному вигляді, або розв'язання буде супроводжуватися громіздкими обчисленнями й мати числовий вигляд, особливо при великих n_1 і n_2 . Отже, необхідно використати деякі властивості вартості $C(X_1, \dots, X_N)$... Дійсно, з адитивності C випливає, що не вся вартість C залежить від X_i , а лише деяка частина, що створює якісний параметр X_i . Наприклад, випромінювану потужність наземної станції створює в основному передавач із блоками живлення.

Тому залежність $C(X_{\text{прд}})$ визначається залежністю вартості передавача $C_{\text{прд}}$ від випромінюваної потужності.

У найгіршому разі, коли вартість блоків не розділяється на окремі залежності від фазових параметрів, вона все-таки буде залежати від невеликого числа параметрів. Наприклад, вартість антени залежить від КНД, ККД і коефіцієнта використання площі антени й, отже, є в цьому випадку функцією трьох змінних. Приймач при деяких спрощеннях можна розділити на субблоки, вартість кожного з яких залежить лише від одного параметра.

У загальному випадку

$$C = \sum_k C_k(X_k) + \sum_\ell C_\ell(X_{\ell 1}, X_{\ell 2}) + \sum_m C_m(X_{m1}, X_{m2}, X_{m3}) + \dots \quad (3.14)$$

Хоча вираз (3.12) для C став набагато конкретнішим на вигляд і функції $C_k(X_k)$, $C_\ell(X_{\ell 1}, X_{\ell 2})$ і $C_m(X_{m1}, X_{m2}, X_{m3})$, як правило, монотонні, то труднощі при формалізації системи обмежень, про які говорилося, не виключені.

Для спрощення програми розв'язання задачі скористаємося новим методом математичного програмування [38].

Сутність його полягає в такому:

1) всі технічні параметри і їх сепарабельні монотонні функції (фазові параметри), що входять у цільову функцію, перетворюємо до такого вигляду, коли чим вони менші, тим краще для системи;

2) цільова функція і її складові частини подаються (за рахунок нелінійних монотонних перетворень) як окремі функції фазових параметрів;

3) у розвиток методу Вульфа розкладаємо обмеження за вартістю в ряд Тейлора й залишаємо тільки лінійні складові, при цьому функція вартості також стає сепарабельною;

4) за рахунок сепарабельності задача розпадається на сепарабельні спрощені задачі, для яких відомі розв'язання у квадратурах (у вигляді формул);

5) отримані рішення зшиваються поетапно у вигляді блокового програмування;

6) отримані у квадратурах розв'язання використовуються як ітеративні формули зі збіжністю до необхідної точності;

7) результати числового розв'язку визначаються з кінця, як у методах блокового й динамічного програмування.

Переваги нового методу математичного програмування:

1) задача зводиться до сукупності відомих задач, тобто ітеративні функції стають відомими; 2) тому задачі стають універсальними для будь-яких фазових функцій; 3) вирішується проблема багатовимірності; 4) у результаті розв'язання кінцевий результат отриманий у квадратурах, що дозволяє досліджувати особливості й поведіння оптимуму.

Таким чином, розкладаємо в ряд Тейлора обмеження за вартістю й потім залишаємо тільки лінійні члени.

$$C(X_1, \dots, X_1) = C(X_{10}, \dots, X_{10}) + \sum_{i=1}^1 C'_{i0}(X_i - X_{i0}) + \sum_{ij}^1 C''_{i0} \frac{1}{2} (X_i - X_{i0})(X_j - X_{j0}) + \dots, \quad (3.15)$$

$$\text{де } C'_{i0} = \frac{\partial C}{\partial X_i} / X_i = X_{i0}, C''_{i0} = \frac{\partial^2 C}{\partial X_i \partial X_j} / X_i = X_{i0}, X_j = X_{j0}.$$

Оскільки статистика вартості визначається за технічними параметрами, її необхідно перераховувати для фазових параметрів. Розкладання в ряд (лінеаризація) здійснюється в околі такої точки (X_{01}, \dots, X_{0N}) , що лежить усередині часто використовуваної ділянки.

Як апріорний вектор фазових параметрів \bar{X}_0 краще вибирати параметри сучасної системи.

Таким чином, завдяки лінеаризації обмежень задача спрощується й з'являється можливість одержати розв'язок у вигляді формул. Потрібно знайти

$$\min D \left[\frac{\Delta V_r}{V_r} \right] = \min_{\begin{Bmatrix} X_i \\ X_j \end{Bmatrix}} \left(\frac{\text{const}}{\prod_{j=1}^{n_1} X_j} + \sum_{i=1}^{n_2} X_i^2 \right) + D_c \quad (3.16)$$

при обмеженні на параметри, отримані з (3.15):

$$\sum_{k=1}^{n_1+n_2} C_{ok} + \sum_{j=1}^{n_1} C'_{oj}(X_j - X_{oj}) + \sum_{i=1}^{n_2} |C'_{oi}|(X_{oi} - X_i) = C, \quad (3.17)$$

$$X_{j\text{пред}} \geq X_j \geq 0, \quad 1 \gg X_i < X_{i\text{пред}},$$

де $N_I = n_1 + n_2$.

При постановці розглянутої задачі про перерозподіл ресурсів або зусиль блоків системи в процесі вимірювань радіальної швидкості були зроблені такі допущення й обмеження:

- відношення сигнал/шум $q \gg 1$, через що типову структуру реального вимірника, що використовує ШПС, можна вважати квазіоптимальною, що забезпечує одержання ефективної оцінки;

- враховані основні параметри системи, що характеризують якість блоків і беруть участь в оптимізації. Інші параметри, наприклад, надійність, вага, фіксовані й дорівнюють часто застосовуваним значенням. Відповідно статистика набирається з вибірок при тих же фіксованих параметрах;

- вимірювання проводяться в умовах стійкого автосупроводження за кутами і за частотою;

- тому схеми пошуку сигналу повинні оптимізуватись за іншими критеріями;

- у всіх наближених виразах залишені лише складові нижчого порядку малості;

- лінійні обмеження (3.17) справедливі лише на деякій ділянці навколо апріорного вектора \bar{X}_0 . Довжина ділянки пропорційна радіусу кривизни $C_i(X_i)$;

- дисперсія помилки вимірювання швидкості служить цільовою функцією для оптимізації РТС на максимальній дальності.

У результаті можна зробити нижченаведені висновки.

1. При формалізації задачі отримані опукла цільова функція й лінеаризовані обмеження на параметрі.

2. Цільова функція придатна для оцінки першого наближення точності проєктованих реальних вимірювальних систем того ж класу.

3. При деяких спрощеннях, пов'язаних з використанням ШПС, за цільовою функцією можна оцінити точність систем, що працюють з простими сигналами, якщо брати до уваги ефекти, пов'язані з втратами енергії при обробці сигналу.

Нормально поставлена задача параметричного синтезу справедлива для будь-яких вимірювальних та інформаційних систем, у тому числі суміщених.

3.6. Розв'язання задачі оптимізації ІВРТС

Загальна задача подана у вигляді двох сепарабельних задач.
Перша задача має вигляд:

$$F_{n_1}(C_1) = \min_{\{X_j\}} \frac{1}{\prod_{j=1}^{n_1} X_j}$$

при

$$\sum_{j=1}^{n_1} C'_{oj}(\bar{X}_0) X_j = C_{\varepsilon 1}(\bar{X}_0),$$

де

$$\Delta C_{n_1} = C_1 - \sum_{j=1}^{n_1 - q_1 - 2r_1} C_{oj}; \quad C_{\varepsilon 1} = \Delta C_{n_1} + \sum_{j=1}^{n_1} C'_{oj} X_{oj};$$

$$X_j > 0.$$

Розв'язання відоме:

це мінімум

$$F_{n_1}(C) = \frac{\prod_{j=1}^n C'_{oj}}{\left(\frac{C_{\varepsilon 1}}{n_1}\right)^{n_1}}$$

при оптимальному розв'язку

$$X_{n_1} = \frac{C_{\varepsilon 1}}{n_1 C'_{on_1}}. \quad (3.18)$$

Доведення справедливості (3.18) викладено в роботі [38].

Визначимо розв'язок другої сепарабельної задачі.

Друга задача має вигляд:

$$F_{n_2}(\Delta C_2) = \min \sum_{i=1}^{n_2} X_i^2$$

при
$$\sum_{i=1}^{n_2} [C'_{oi}(\bar{X}_0)(X_{oi} - X_i) + C_{oi}] \leq C_2(\bar{X}_0),$$

або

$$\sum_{i=1}^{n_2} C'_{oi}(\bar{X}_0)X_i \geq \sum_{i=1}^{n_2} C'_{oi}X_i - \Delta C_{n_2} = C_{32}(\bar{X}_0),$$

$$X_i \geq 0,$$

де
$$C_{32} = \sum_{i=1}^{n_2 - q_2 - 2r_2} C_{oi} + \sum_{i=1}^{n_2} C'_{oi}X_{oi} - C_2, \quad \Delta C_{n_2} = C_2 - \sum_{i=1}^{n_2 - q_2 - 2r_2} C_{oi}.$$

Мінімум суми доданків при обмеженні за вартістю в припущенні $X_i \geq 0$ дорівнює [31, 38]:

$$F_{n_2}(C_{32}) = \frac{C_{32}^2(\bar{X}_0)}{\sum_{i=1}^{n_2} (C'_{oi}(\bar{X}_{oi}))^2}$$

при

$$X_{n_2 \min} = \frac{C_{32}(\bar{X}_0)C'_{on_2}(\bar{X}_{on_2})}{\sum_{i=1}^{n_2} (C'_{oi}(\bar{X}_{oi}))^2}. \quad (3.19)$$

Потім визначається умовний мінімум цільової функції (3.16):

$$F(\Delta C) = \min_{\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{array} \right\}} [F_{n_1}(\Delta C_{n_1}) + F_{n_2}(\Delta C_{n_2})]$$

при

$$\Delta C_{n_1} + \Delta C_{n_2} \leq \Delta C.$$

Відповідно до отриманих розв'язків (3.18) і (3.19) вирази для F запишемо у вигляді

$$F(\Delta C) = \min_{\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_1 \\ \Delta C_2 \end{array} \right\}} \left[\frac{A}{(\Delta C_{n_1} + B)^{n_1}} + \frac{(D - \Delta C_{n_2})^2}{\varepsilon} \right] + D_c$$

при

$$\Delta C_{n_1} + \Delta C_{n_2} \leq \Delta C,$$

$$\text{де } A = \text{const } n_1^{n_1} \prod_{j=1}^{n_1} C'_{oj}; \quad B = \sum_{j=1}^{n_1} C'_{oj} X_{oj}.$$

Методом Ньютона-Рафсона (дотичних) [31, 38] оптимальне поведження на останньому кроці $\Delta C_{2\text{opt}}$ визначимо з рівняння

$$\frac{A\varepsilon \frac{n_1}{2}}{\left[B + \Delta C - \Delta C_{n_2\text{opt}} \right]^{n_1+1}} = D - \Delta C_{n_2\text{opt}}. \quad (3.20)$$

Для $\Delta C_{n_2\text{opt}}$ з формули (3.20) одержимо рекурентну формулу

$$\Delta C_{n_2(k)} = D - \frac{\left[\Delta C + B - \Delta C_{n_2(k-1)} \right] A\varepsilon \frac{n_1}{2}}{\frac{n_1}{2} A\varepsilon(n+1) + \left[\Delta C + B - \Delta C_{n_2(k-1)} \right]^{n_1+2}} \quad (3.21)$$

при

$$\Delta C_{n_2(1)} \in [0, D],$$

де k - номер кроку ітерації.

У (3.21) знайдена процедура послідовного визначення $\Delta C_{n_2\text{opt}}$.

Звичайно

$$(\Delta C + B) \gg \Delta C \quad (\Delta C + B) \gg \frac{n_1}{2} A\varepsilon(n_1 + 1).$$

Тоді

$$\Delta C_{n_2 \text{ opt}} \approx D - \frac{A \varepsilon \frac{n_1}{2}}{(\Delta C + B)^{n_1 + 1}},$$

$$F(\Delta C) \approx \frac{A}{(\Delta C + B - D)^{n_1}} + \varepsilon \frac{\left(A \frac{n_1}{2}\right)^2}{(\Delta C + B)^{2(n_1 + 1)}} + D_c$$
(3.22)

i

$$\Delta C_{n_1 \text{ opt}} = \Delta C - \Delta C_{n_2 \text{ opt}}.$$

Параметри $X_{j \text{ opt}}$ і $X_{i \text{ opt}}$ визначаються з (3.18) і (3.19), а оптимальні технічні параметри системи – з рівняння

$$Y_{j \text{ opt}} = Y_{j \text{ opt}}(X_{j \text{ opt}}).$$

Оптимальні вартості блоків знаходяться з рівнянь лінійних обмежень.

З формул (3.22) можна побачити шляхи подальшого вдосконалювання даних апаратури і технології виробництва.

Крім того, з (3.22) впливає, що оскільки межа вимірювань радіальної швидкості визначається обмеженим знанням швидкості поширення радіохвиль D_c , то існує межа й для асигнувань. Якщо потрібно одержати дисперсію $F(\Delta C)$ у α більшу, ніж D_c , то при застосуванні формул (3.22) одержимо значення максимальних асигнувань на оптимальну систему

$$\Delta C_{\text{max}} = B + \sqrt{\frac{A}{(\alpha - 1)D_c}} + \frac{\frac{n_1^2}{4} \varepsilon A^{\frac{2n_1 - 1}{n_1}}}{[(\alpha - 1)D_c]^{\frac{n_1 + 1}{n_1}} n_1 (D + \sqrt{\frac{A}{(\alpha - 1)D_c}})^{2(n_1 + 1)}}. \quad (3.23)$$

3.7. Оптимальні параметри систем

З огляду на отримані результати, запишемо в прийнятих позначеннях оптимальні параметри й вартості системи у вигляді, зручному для розрахунків:

$$\Delta C_{2(k)} = D - \frac{[\Delta C + B - \Delta C_{2(k-1)}] A \varepsilon^{\frac{n_1}{2}}}{\frac{n_1}{2} A \varepsilon (n_1 + 1) + [\Delta C + B - \Delta C_{2(k-1)}]^{n_1 + 2}}$$

при $(\Delta C + B) \gg \Delta C_2$

$$(\Delta C + B) \gg \frac{n_1}{2} A \varepsilon (n_1 + 1);$$

$$\Delta C_{2opt} \cong D - \frac{A \varepsilon^{\frac{n_1}{2}}}{(\Delta C + B)^{n_1 + 1}}, \Delta C_{1opt} = \Delta C - \Delta C_{2opt}.$$

Згідно з (3.18), (3.19) і (3.22) визначимо фазові параметри X_j

$$X_{kopt} = \frac{C_1 - \sum_j C_{0j} + \sum_j C'_{0j} X_{0j}}{nC'_{0k}}.$$

Звідси можна одержати, знаючи фазові параметри, всі технічні параметри згідно з [31, 38] зі зворотних залежностей

$$Y_{jopt} = Y_{jopt}(X_{jopt}):$$

а) відношення α_j ширини діаграми спрямованості антени за потужністю в площині θ_x до величини дисперсії відповідної похибки кутового супроводу

$$\alpha_{jopt} = \frac{2X_{jopt}^2}{1 - X_{jopt}^2};$$

б) тривалість сигналу T_{opt} , рівну часу інтегрування

$$T_{opt} = X_{jopt}^{\frac{1}{3}};$$

в) відношення $a_{opt}(X_{jopt})$ смуги пропускання високочастотного тракту на рівні половини максимуму до ширини спектра ШШС по нулях

$$a_{opt} = \frac{\ln 2 + B}{1 - X_{jopt}},$$

де $B = 1 - \rho$;

г) смуга системи фазового автопідстроювання частоти

$$\Pi_{фаз\ opt} = \frac{\ln \frac{1}{1 - X_{jopt}}}{T_0},$$

де T - фіксований час інтегрування, рівний очікуваному значенню $T = T_0$;

д) абсолютне значення результуючої похибки $|\delta t|_{opt}$ каналу синхронізації при відомому законі руху

$$|\delta t|_{opt} = \tau_{\vartheta}(1 - X_{jopt});$$

е) середньоквадратична похибка $\sigma_{\delta t opt}$ каналу синхронізації

$$\sigma_{\delta t opt} = \sqrt{\frac{2\pi}{2}} \tau_{\vartheta}(1 - X_{jopt});$$

є) коефіцієнт шуму $\text{Ш}_{\text{увч1opt}}$ підсилювача високої частоти наземного приймача

$$\text{Ш}_{\text{увч4opt}} = \frac{1}{X_{\text{jopt}}},$$

ж) сумарна шумова температура $T_{0\text{ачopt}}$ наземної приймальної антени

$$T_{0\text{ач opt}} = 1/X_{\text{jopt}};$$

з) інші параметри, що беруть участь в оптимізації

$$y_{\text{jopt}} = X_{\text{jopt}}.$$

Фазові параметри X_{jopt} визначаються як

$$X_{\text{jopt}} = \frac{C'_{0i}}{\sum_{i=1}^{n2} (C'_{0i})^2} \left(\sum_i C_{0i} + \sum_{i=1}^{n2} C'_{0i} X_{0i} - C \right).$$

При цьому

$$\frac{\Delta f_{i\text{opt}}}{f_0} = 2\sqrt{\frac{m}{1}} X_{i\text{opt}}.$$

Оптимальні вартості системи потрібно визначити з виразу

$$C_k = C_{0k} + C^1_{0k}(X_{k\text{opt}} - X_{k0}),$$

або

$$C_k = C_{0k} + C^1_{0k}(X_{k\text{opt}} - X_{k01}) + C^1_{0j2}(X_{k2\text{opt}} - X_{k02}) \quad \text{і т.д.}$$

Визначимо область значень фазових параметрів, для яких розв'язання (3.18) – (3.19) вважаються оптимальними. Ця область визначається з умови близькості реальних $C_i(X_i)$ до апроксимуючих значень лінійних обмежень.

На практиці набагато зручніше оцінювати близькість функції C_{in} та її апроксимації параметром $\Delta C_{\alpha H}$, який, як і h , той самий для всіх i та j

$$X_{i1} \cong X_{oi} + \sqrt{\frac{2\Delta C_{\alpha H}}{C''_{oi}(X_{oi})}}$$

Таким чином, якщо розв'язок (багатовимірний вектор параметрів X_{opt}) потрапляє в інтервал хорошої апроксимації, то розв'язок є досить точним і визначається формулами (3.18) і (3.10). Якщо вихідні криві регресії лінійні й без лінеаризації, то розв'язки точні завжди.

Якщо розв'язок потрапляє в інтервал хорошої апроксимації лінійними функціями, але перевищує граничне значення, то треба на цьому кроці обмежитися граничним значенням параметра.

Якщо задача розв'язана, то для користі САПР рано ставити крапку, тому що це всього лише один оптимальний розв'язок. Набагато корисніше одержати цілу множину розв'язків у діапазоні змін асигнувань. Тоді будемо мати криву обміну [11] між показниками якості, тобто залежність енергетичного потенціалу ІВРТС і залежність розв'язків від асигнувань у їх широкому діапазоні. Така крива може служити підставою для замовника систем і виконавця для висновку обґрунтованого договору на виробництво.

3.8. Приклад оптимізації системи за трьома параметрами

Уже відомі функції вартості блоків системи залежно від відповідних параметрів [31, 38]:

$$\begin{aligned} C^{[1]} &= K_1 \sqrt{X^{[1]}}; \\ C^{[2]} &= K_2 + K_3 (X^{[2]})^2; \\ C^{[3]} &= \frac{K_4}{(X^{[3]})^{K_5}}, \end{aligned}$$

де $C^{[1]}$ і $X^{[1]}$, $C^{[2]}$ і $X^{[2]}$, $C^{[3]}$ і $X^{[3]}$ - відповідно вартість і потужність передавача, вартість і КНД антени, вартість і відносна короткочасна нестабільність стандартів частоти;

K_1, \dots, K_5 - числові коефіцієнти, що залежать від рівня розвитку техніки й виробництва відповідних блоків.

Припустимо, що оптимізується вимірник радіальної швидкості об'єкта. Вимірник має відому структуру (рис. 3.2) і відому цільову функцію (3.11). Відомими також передбачаються обмеження на параметри X_i і X_j за умовами їх фізичної реалізованості

$$0 < X_i < X_{\text{переді}}, X_{j\text{перед}} < X_j < X_{j\text{макс}}.$$

Нехай, наприклад, відомі коефіцієнти

$$K_1=1,41; K_2=5; K_3=6 \cdot 10^{-4}; \text{const}=0,04.$$

Первісні значення параметрів (потужності передавача $X_0^{[1]}$, КНД антени $X_0^{[2]}$ і відносна нестабільність частоти $X_0^{[3]}$) обрані так, що або відомі для системи такого ж класу, або кращі для застосування на думку експертів і т. п.

$$X_0^{[1]}=100, X_0^{[2]}=400, X_0^{[3]}=10^{-6},$$

а вартість усієї проектованої частини системи $C_0=120$ умов. грош. од. У цьому випадку $n_1=2$, $n_2=1$.

Користуючись формулами (3.18), (3.19), (3.22), можна визначити $X_{\text{opt}}^{[i,j]}$, $C_{\text{opt}}^{[i,j]}$, A , E , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , дотримуючись потрібного алгоритму.

Результати розрахунку зведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

X, C, C ¹	1	2	3	4	5
X ^[1]	100	1463	2568	4248	4500
X ^[2]	400	320	240	207	196
X ^[3]	10 ⁻⁴	6,2·10 ⁻⁶	8,08·10 ⁻⁷	3,3·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁶
C ^[1]	14,1	54,5	71,5	92	95
C ^[2]	101	66,2	39,8	30,8	28,1
C ^[3]	0,62	0,4	1,19	0,832	0,567
C ^{1[1]}	7,05·10 ⁻²	1,83·10 ⁻³	1,39·10 ⁻²	1,08·10 ⁻²	1,05·10 ⁻²
C ^{1[2]}	0,48	0,384	0,295	0,248	0,235
C ^{1[3]}	1,58·10 ⁵	1,61·10 ³	3,7·10 ⁶	6,3·10 ⁵	5·10 ⁵

З таблиці можна побачити, що вплив X^[3] незначний, оскільки наявні лише невеликі зміни вартості. Тому X_{opt}^[3] доцільно брати на два порядки краще первісного значення, тобто X_{opt}^[3]=10⁻⁸, не змінивши істотно вартість системи.

Неважко побачити з таблиці, що отримані оптимальні параметри можуть істотно підвищити точність проектного вимірника при тих же асигнуваннях C₀=120.

Дійсно, похибка вимірювань зменшиться при цьому в E_ф раз, де

$$E_{\text{TM}} = \frac{D_{\omega\text{Л}0}}{D_{\omega\text{Лopt}}} = \frac{\frac{\text{const}}{X_o^{[1]}X_o^{[2]}} + X_o^{[3]}}{\frac{\text{const}}{X_{\text{opt}}^{[1]}X_{\text{opt}}^{[2]}} + X_{\text{opt}}^{[3]}}$$

З огляду на те, що X_{opt}^[3] << D_{ω допт}, визначимо ефективність E_ф оптимізації E_ф=21,2.

Таким чином, похибку вимірювання параметра сигналу можна зменшити у 21 раз при проектуванні системи у порівнянні із системами, у яких були параметри $X_{0i,j}$. Варто очікувати, що для більшого числа відомих залежностей вартості від параметрів ефективність оптимізації буде більшою.

Контрольні питання

1. Як формалізується цільова функція задачі оптимізації?
2. Назвати головні показники якості інформаційно-вимірювальних систем.
3. На яких множинах потрібно приймати рішення про ТТВ систем?
4. Які обмеження існують при оптимізації вимірювальних систем?
5. Чому вартість є нечіткою множиною?
6. Що таке постановка завдань оптимізації?
7. Що таке параметричний синтез системи?
8. Що таке блокове програмування?
9. Який пропонується метод розв'язання задач САПР?

Висновки

Таким чином, для широкого класу завдань показана можливість одержання оптимуму й ітеративного розв'язання задач у загальному (аналітичному) вигляді, що дозволяє використати їх для цілей САПР.

Розв'язок справедливий для будь-якого числа технічних параметрів і будь-яких техніко-економічних залежностей.

Основна перевага даної методики оптимізації ІВРТС для САПР полягає в тому, що вона дозволяє узагальнити задачу для довільного числа критеріїв.

Розглянемо питання про те, у якій мірі у задачі враховуються складові частини САПР.

1. У цільовій функції задачі в найбільш повному вигляді враховані основні залежності енергетичного потенціалу ІВРТС

від технічних параметрів, параметрів нестабільностей, збурювань і розстроювань. Викладено відомі [30] й отримані нові [31,38] залежності зазначених факторів.

2. У роботі можуть бути використані відомі методи математичного програмування. Однак вони мають такі недоліки: 1) результат знаходиться тільки в числовому вигляді, що незручно для системного аналізу стабільності або поведіння розв'язку й оптимуму; 2) існує проблема багатовимірності, з якою потрібно боротися; 3) немає універсальних, але простих методів розв'язання задач, придатних для САПР ІВРТС, 4) не враховуються особливості інженерних задач в області формування функцій мети. Використання нового методу послаблює зазначені недоліки.

3. Постановка задач оптимізації ІВРТС із урахуванням обмежених асигнувань робить модель ефективності систем адекватною реальним системам, оскільки ціна в значній мірі відбиває технологічність систем та їх ФЕ.

4. Як узагальнений програмний продукт можна прийняти ітеративні формули для розрахунку оптимальних розв'язків і формули для розрахунку результату оптимізації ІВРТС на етапі ескізного проектування.

5. Запропоновано новий метод математичного програмування в розвиток методу Вульфа, що дозволяє спростити програмні продукти САПР ТС й ІВРТС та одержати зазначені переваги з погляду використання методів оптимізації програмного продукту.

У перспективі розвитку програмного продукту САПР варто підвищувати адекватність моделей ІВРТС за рахунок використання більш повного складу ТТВ.

Для масового використання оптимальних розв'язків варто одержувати не один розв'язок для заданих ТТВ і техніко-економічної статистики, а діапазонні криві обміну й залежності оптимальних розв'язків від ТТВ.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Амиантов, И.Н. Теория связи [Текст] /И.Н. Амиантов. – М.: Сов. радио, 1971.
2. Бакут, П.А. Вопросы статистической теории радиолокации [Текст] /П.А.Бакут, И.А. Большаков. – М.: Сов. радио, 1964. – Т.1, 2.
3. Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман. – М.: ИИЛ, 1960.
4. Вакман, Д.Е. Сложные сигналы и тело неопределенности в радиолокации [Текст] / Д.Е. Вакман. – М.: Сов. радио, 1966.
5. Вудворд, Ф. Принцип обратной вероятности в теории передачи сигналов [Текст] / Ф. Вудворд, Н. Девис. // Теория передачи электрических сигналов при наличии помех. – М.: ИИЛ, 1953.
6. Ван Трис. Теория обнаружения оценок и модуляции [Текст] / Ван Трис. – М.: Сов. радио, 1972. – Т.1.
7. Винокуров, В.И. Вопросы обработки сложных сигналов в корреляционных системах [Текст] / В.И. Винокуров, Р.А. Ваккер. – М.: Сов. радио, 1972.
8. Горяинов, В.Т. Влияние нестабильности несущей частоты на помехоустойчивость дискретных систем радиосвязи [Текст] / В.Т. Горяинов // Электросвязь. – 1966. – Т. 21. – № 12.
9. Гличев, А.В. Экономическая эффективность технических систем [Текст] / А.В. Гличев. – М.: Экономика, 1971.
10. Гуткин, Л.С. Проблемы оптимизации радиосистем [Текст] / Л.С. Гуткин // Радиотехника. – 1971. – № 3.
11. Гуткин, Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества [Текст] / Л.С. Гуткин. – М.: Сов. радио, 1974.
12. Грудинская, Г.П. Распространение радиоволн [Текст] / Г.П. Грудинская. – М.: Высш. шк., 1967.
13. Евтянов, С.Н. Переходные процессы в приемо-усилительных схемах [Текст] / С.Н.Евтянов. – М.: Связьиздат, 1948.
14. Зуховицкий, С.Н. Линейное и выпуклое программирование [Текст] / С.Н. Зуховицкий, Л.И. Авдеева. – М.: Наука, 1967.

15. Зюко, А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] / А.Г. Зюко. – М.: Связь, 1972.

16. Калмыков, В.В. К вопросу об оптимизации параметров системы ввода в синхронизм широкополосной системы связи [Текст] / В.В. Калмыков // Вопросы радиоэлектроники: научн.-техн. сб. Сер. ТРС. – 1974. – Вып. 2.

17. Космические траекторные измерения [Текст] / под ред. П.А. Агаджанова и В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1970.

18. Козлов, Н.Н. Об оптимизации процесса траекторных измерений [Текст] / Н.Н. Козлов // Космические исследования. – 1971. – Т.9. – Вып. 1.

19. Кузнецова, Д.Г. Основные принципы оценки стоимости серийно изготавливаемой электронной аппаратуры [Текст] / Д.Г. Кузнецова, Е.Ю. Намиот // Вопросы радиоэлектроники. – 1969. – № 31. – Сер. 12.

20. Калинин, А.Ф. Вопросы построения КПРД ИСЗ научного и народнохозяйственного назначения [Текст]: автореф. дис. ... канд техн. наук / А.Ф. Калинин. – М.: НИИТП, 1969.

21. Окунев, Ю.В. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи [Текст] / Ю.В. Окунев, В.И. Плотников. – М.: Связь, 1976.

22. Пратт, В.К. Определение оптимальных характеристик оптических систем [Текст] / В.К. Пратт, Стокс, Хинкли // Труды НИИР. – 1970. – Т. 58, № 10. – С. 355 – 364.

23. Свириденко, С.С. Об искажениях псевдослучайного сигнала с ограниченным спектром на выходе фильтра [Текст] / С.С. Свириденко // Радиотехника. – 1969. – № 8.

24. Точность измерения параметров движения космических аппаратов [Текст] – М.: Сов. радио, 1970.

25. Тузов, Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах [Текст] / Г.И. Тузов. – М.: Сов. радио, 1967.

26. Талызин, Н.В. Об оптимальных параметрах и экономической эффективности многостанционной системы спутниковой связи [Текст] / Н.В. Талызин, Л.Я. Кантор, Е.А. Манякин, Ю.М. Паянский // Радиотехника. – 1969. – № 11.

27. Чупик, С.И. О распределении требований к точности измерительных устройств многопараметрических систем при учете их стоимости и надежности [Текст] / С.И. Чупик // Эффективность обработки информации в системах траекторных измерений. – М.: МО СССР, 1968.

28. Ширман, Я.Д. Обнаружение радиолокационных сигналов и измерение параметров [Текст] / Я.Д. Ширман. – М.: Сов. радио, 1969.

29. Алешин, Г.В. Эффективность радиотехнических устройств оценивания параметров сигнала [Текст] / Г.В.Алешин. – Харьков: ХВУ, 1992.

30. Лезин, Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов [Текст] / Ю.С.Лезин. – М.: Сов. радио, 1969.

31. Алешин, Г.В. Основы построения оптимальных информационно-измерительных радиотехнических систем [Текст] / Г.В. Алешин. – Харьков: ХВУ, 1994. – 252 с.

32. Консон, А.С. Экономические расчеты в приборостроении [Текст] / А.С. Консон. – М.: Высш. шк., 1973.

33. Князев, А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств [Текст] / А.Д.Князев. – М.: Радио и связь, 1984.

34. Аповорич, А.Ф. Статистическая теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств [Текст] / А.Ф. Аповорич. – Минск: Наука и техника, 1984.

35. Альошин, Г.В. Ефективність інформаційно-вимірювальних систем [Текст] / Г.В. Альошин. – К.: МОУ, ХУПС, 2005. – 294 с.

36. Алешин, Г.В. Эффективность сложных радиотехнических систем [Текст] / Г.В.Алешин, Ю.А. Богданов. – К.: Наук. думка, 2008. – 288 с.

37. Алешин, Г.В. Методика определения зависимости показателя экономичности УРЧ от его параметров по маркетинговым данным [Текст] / Г.В. Алешин, В.П. Коцюба // Радиотехника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ, 2003. – № 2. – С. 4-6.

38. Альошин, Г.В. Оцінка якості інформаційно-вимірювальних систем [Текст] / Г.В. Алешин. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 300 с.

