

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТСМ-23м
спеціальності 172 – Електронні
комунікації та радіотехніка

_____ Каневський А.О.

Керівник: д.т.н., професор каф. ІКСТ

_____ Кичак В.М.
« 16 » 12 2024 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС

_____ Осадчук О.В.
« 16 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

_____ д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 16 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

 **“24” 09 2024 року**

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Каневському Антону Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ

керівник роботи Кичак Василь Мартинович, докт. техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “17” 09 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи смуга частот каналу 1,4...20 МГц; стандарт стільникового зв'язку LTE; технологія мультиплексування OFDM; середня напруженість електромагнітного поля 1 мкВ/м; висота передавальної антени 10м; смуга робочих частот 900...1900 МГц.

4. Зміст текстової частини: Вступ; Багатокритеріальний підхід до управління частотно-територіальним плануванням мереж стільникового зв'язку; Математичне моделювання систем стільникового зв'язку; Економічна частина

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Загальна будова системи стільникового радіозв'язку; Побудова комплексу рішень; Структура еволюційного представлення бездротової мережі; Загальна схема отримання оптимального рішення; Планування мережі LTE; Алгоритм оцінки видимості комірок; Блок-схема алгоритму побудови зон обслуговування; Структурна схема алгоритму побудови радіопокриття БС; Схема пошуку рішення;

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Студент

Каневський А.О.

Керівник роботи

Кичак В.М.

ANNOTATION

UDC 621.335

Kanevskyi A.O. Multicriteria optimization of TCM control systems. Master's qualification work in specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 112 c.

In Ukrainian. Bibliography: 20 titles; Figures: 23; Table 17.

The work is devoted to the study of methods for optimization of TCM control systems on the example of optimization of a wireless cellular system.

Purpose The purpose of the work is to increase the efficiency of frequency-area design of radio communication systems in conditions of limited resources.

The main objectives of the research work are to analyze existing methods for optimizing wireless TCMs; study methods for planning and optimizing network resources; mathematical modeling of a cellular communication system.

The work consists of four chapters. In the first section, a feasibility study of the feasibility of conducting research work is carried out and computer-aided design systems are considered.

The second section presents a multi-criteria approach to the management of frequency-territorial planning of cellular networks.

In the third section, mathematical modeling of cellular communication systems is carried out.

Section 4 provides an economic justification for the feasibility of this research work

Translated with DeepL.com (free version)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.335

Каневський А.О. Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 112 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 20 назв; рис.: 23; табл. 17.

Робота присвячена дослідженню методів за засобів оптимізації систем керування ТКМ на прикладі оптимізації безпроводової стільникової системи.

Метою роботи є підвищення ефективності частотно-територіального проектування систем радіозв'язку в умовах обмеженості ресурсів.

Основними завданнями наукової роботи є аналіз існуючих методів оптимізації бездротових ТКМ; дослідження методів планування та оптимізації ресурсів мережі; математичне моделювання системи стільникового зв'язку.

Робота містить чотири розділи. У першому розділі проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності проведення науково-дослідної роботи та розглянуто системи автоматизованого проектування.

У другому розділі виконано багатокритеріальний підхід до управління частотно-територіальним плануванням мереж стільникового зв'язку.

У третьому розділі проведено математичне моделювання систем стільникового зв'язку.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Системи автоматизованого проектування радіомереж	8
1.1. Загальні принципи побудови радіоелектронних систем	8
1.2. Програмні пакети для планування радіомережі	22
1.3. Постановка задачі дослідження	24
2. Багатокритеріальний підхід до управління частотно-територіальним плануванням мереж стільникового зв'язку	27
2.1. Загальний підхід та принципи багатокритеріальної оптимізації	27
2.2. Постановка задачі керування та планування на основі моделей багатокритеріального вибір	28
2.3. Підбір якісних показників	29
2.4. Підбір критеріїв оптимальності	32
2.5. Формування набору допустимих варіантів системи	34
2.6. Пошук Парето-оптимальних варіантів системи	34
2.7. Методи пошуку оптимальних варіантів побудови мережі	36
2.8. Оптимізація проектних рішень при плануванні радіомереж	49
2.9 Висновки	50
3. Математичне моделювання систем стільникового зв'язку	52
3.1. Визначення параметрів конструкції	52
3.2. Особливості планування мережі LTE	57
3.3. Моделі впливу поширення радіохвиль на ефективність системи	61
3.4. Моделювання зони покриття	74
3.5. Вибір оптимального варіанту мережі стільникового зв'язку	77
3.6. Висновки	82
4. Економічна частина.....	Error! Bookmark not defined.
4.1. Оцінювання наукового ефекту	84
4.2. Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	87
4.3. Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	97
4.4. Висновок до розділу 4	98

ВИСНОВОК.....	99
Перелік посилань.....	100
Додаток А.....	102
Додаток Б	112

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час обсяг інформації, необхідної людству для економічної, культурної, наукової та іншої діяльності, переживає епоху бурхливого зростання. Одну з найважливіших ролей у забезпеченні обміну інформацією відіграють різні системи радіозв'язку, системи зв'язку між рухомими об'єктами, системи супутникового зв'язку, радіотехнічні системи вилучення інформації та радіоуправління площа покриття, точність одержуваної інформації, швидкість, надійність і завадостійкість, пропускна здатність, енергоспоживання і перспективи, тобто здатність задовольняти потреби користувачів протягом тривалого часу.

Основними напрямками вдосконалення систем радіозв'язку є використання нових фізичних принципів роботи, інтелект на основі сучасної комп'ютерної техніки, підвищення ролі засобів обробки інформації, розширення використовуваного діапазону радіохвиль і умов експлуатації.

Створення високопродуктивних радіосистем пов'язане з вирішенням ряду завдань аналізу і синтезу з урахуванням можливих станів експлуатації. За останні 15 років величезний успіх систем мобільного зв'язку стимулював розвиток технологій і значною мірою сприяв створенню підходів до математичного моделювання та алгоритмів оптимізації проектування та прийняття управлінських рішень. На етапі побудови та експлуатації телекомунікаційної мережі оператор зацікавлений у тому, щоб мережа відповідала необхідним критеріям надійності та якості послуг, що надаються. Завдання вибору оптимального варіанту телекомунікаційної мережі ще на етапі проектування в умовах обмеженого фінансування є найбільш типовим.

Сучасні телекомунікаційні мережі стають все більш складними, до них пред'являються суперечливі техніко-економічні вимоги, які характеризуються сукупністю якісних показників. Як правило, показники якості взаємозалежні і антагоністичні. Телекомунікаційна мережа, як один з видів складної інформаційної системи, може бути представлена у вигляді впорядкованої

сукупності елементів, властивостей і їх взаємозв'язків. Їх конкретне завдання визначає структуру, параметри і ефективність мережі.

Як правило, існує певний набір допустимих конструктивних рішень і необхідно вибрати оптимальне (оптимальне за заздалегідь визначеним критерієм) в завданнях довгострокового планування і проектування телекомунікаційних мереж, а також короткострокового планування і ситуаційного управління з урахуванням сукупності якісних показників. Тому використання багатокритеріальних методів оптимізації для прийняття оптимальних проектних рішень є актуальним.

Питання частотно-територіального планування різних типів телекомунікаційних мереж і організації радіозв'язку розглядали в своїх роботах відомі російські фахівці, такі як В.А. Цимбал, В.Ю. Бабков, А.Г. Самойлов та інші, а також зарубіжні автори – Мішра А.Р., Шевалір К., Гарг В.К.

Аналіз сучасних досліджень в проектування мереж радіозв'язку показав, що завдання проектування не ставляться як багатокритеріальні задачі оптимізації з урахуванням сукупності суперечливих техніко-економічних вимог. Отримані варіанти конструкції не є оптимальними з точки зору набору якісних показників, що призводить до необхідності перепланування цих мереж після їх введення в експлуатацію та моніторингу.

Таким чином, актуальність дослідження продиктована необхідністю розробки математичних і програмних засобів, призначених для оптимізації варіантів проектування на частоті просторове планування мереж радіозв'язку із суворим врахуванням якісних показників на основі багатокритеріальних методів оптимізації.

Створення проблемно-орієнтованих комплексів для автоматизованого проектування радіомереж базується на двох основних напрямках. Перший з них - підбір оптимальних варіантів проектування з урахуванням сукупності якісних показників за допомогою багатокритеріальних методів оптимізації. Другий полягає в реалізації цих методів на комп'ютерах і розробці відповідних програмних пакетів.

Об'єкт дослідження. Методи автоматизації процесу оптимального частотно-територіального проектування мереж радіозв'язку.

Предмет дослідження. У роботі розглядаються моделі, методи, алгоритми та прийоми частотно-територіального планування мереж радіозв'язку.

Мета. Метою роботи є підвищення ефективності частотно-територіального проектування систем радіозв'язку в умовах обмеженості ресурсів.

Методи дослідження. У роботі використані методи математичного моделювання, методи оптимізації, теорія керування, методи еволюційного моделювання, об'єктно-орієнтованого програмування.

Новизна одержаних результатів. У роботі отримано результати, що характеризуються науковою новизною:

- запропоновано та обґрунтовано методи вибору оптимальних варіантів проектування побудови мережі стільникового зв'язку з урахуванням комплексу якісних показників на основі оптимальності Парето;
- удосконалено синтезований гібридний метод пошуку оптимального розв'язання задачі частотно-територіального планування стільникової мережі як задачі векторної (багатокритеріальної) оптимізації;
- запропоновано модифікації моделей поширення радіосигналу та визначення зон прямої видимості, що дозволяє застосовувати їх у процедурах еволюційного моделювання;
- удосконалено методику автоматизації проектування мережі радіозв'язку, яка дозволяє скоротити час на складання частотно-територіального плану мережі на 80%;
- розроблено алгоритмічні інструменти підтримки прийняття рішень для задач, що виникають при проектуванні нових або модифікації існуючих телекомунікаційних мереж різного типу.
- алгоритмічні засоби підтримки прийняття рішень, адаптовані для використання в еволюційних методах моделювання і відповідають рекомендаціям Міжнародного союзу електрозв'язку, в тому числі моделі

поширення радіосигналу і визначення зон прямої видимості, а також методика розрахунку зон покриття.

– методика пошуку оптимального рішення задачі планування мережі радіозв'язку, що базується на використанні методів багатокритеріальної оптимізації, еволюційного моделювання та аналізу ієрархій з урахуванням суперечливих вимог, що виникають у процесі планування;

Достовірність отриманих наукових результатів обумовлена використанням адекватного математичного апарату, що підтверджується їх узгодженістю з результатами комп'ютерного моделювання і порівнянням ряду отриманих результатів з даними, відомими з літератури.

Апробація. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на LIII науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2024 році.

1. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОМЕРЕЖ

1.1. Загальні принципи побудови радіоелектронних систем

В даний час радіозв'язок дає можливість реалізувати повний спектр інформаційних послуг: передачу телефонних повідомлень, обмін даними, підключення до глобальних інформаційних мереж, прийом і передачу відеозображення, телебачення і т.д. Таким чином, використання засобів радіозв'язку реалізує єдиний інформаційний простір, що дозволяє отримувати необхідні послуги в будь-якій точці світу і в будь-який час.

Роль радіозв'язку в суспільстві і техніці постійно зростає: створюються високоефективні системи управління технічними об'єктами, виробничими, технологічними та іншими процесами.

Під системою радіозв'язку розуміють сукупність технічних засобів, призначених для вирішення важливих національно-економічних, наукових, оборонних або спеціальних завдань, пов'язаних з перетворенням інформації, в яких радіоелектронні засоби виконують основні або одну з основних функцій. Радіоелектронні засоби - це технічні засоби, призначені для передачі і прийому радіохвиль, що складаються з одного або декількох передавально-приймальних пристроїв або їх комбінації і включають допоміжне обладнання. Класифікація систем радіозв'язку включає в себе величезне, постійно зростаюче, число видів, що розрізняються за призначенням і характеристиками, що забезпечують задоволення всіх потреб людства.

Існує кілька класифікацій сучасних РЕА, а саме:

- за характером використовуваних хвильових процесів;
- за характером вирішуваних завдань;
- за своєю ієрархією;
- за умовами розміщення;
- за характером взаємодії;
- за своєю елементною базою.

Наприклад, за характером використовуваних хвильових процесів

розрізняють радіотехнічні, оптичні, акустичні та комбіновані радіоелектронні засоби. За характером вирішуваних завдань РЕА можуть бути інформаційними, енергетичними, інформаційно-енергетичними.

В рамках даної роботи найбільш цікавими є інформаційні РЕА, які вирішують такі завдання:

- передача інформації на відстань;
- вилучення інформації;
- інформаційна підтримка систем управління;
- збереження Інформація Можливості В Умови використання радіоелектронних засобів, що створюють перешкоди;
- спотворення або знищення інформації, що передається і отриманої противником;
- захист вашої інформації.

В даний час найбільш розвиненими є РЕА, які вирішують завдання передачі інформації за допомогою радіохвиль на великі відстані. Це проблеми техніки зв'язку, радіо- і телевізійного мовлення, радіотелеметрії та ін.

У дослідженні розглядаються питання побудови та проектування сучасних систем радіозв'язку на прикладі частотно-територіального проектування стільникових мереж мобільного зв'язку.

Сучасні системи стільникового зв'язку

Системи професійного мобільного радіозв'язку (PMR) – це телекомунікаційні системи, які використовують радіоканал як канал зв'язку та забезпечують використання нестационарних (переносних) терміналів користувача [5, 7]. Як правило, вони мають радіальну або радіально-зонну (стільникову) мережеву структуру і можуть використовувати як симплексні (односторонні), так і дуплексні (двосторонні) канали зв'язку. При цьому передбачається, що сама система може використовувати комутовані та виділені дротові телекомунікаційні лінії та обладнання стаціонарних телефонних систем загального користування - PSTN (Public Switched Telephone Network) для своїх потреб у обслуговуванні та управлінні. У зв'язку з великою кількістю систем

мобільного зв'язку, що розрізняються за функціональним складом і призначенням, термін «Система мобільного зв'язку (СМЗ)».

Мобільний зв'язок організовується за допомогою систем стільникового радіозв'язку (ССЗ). Сучасні ССЗ забезпечують абонентську мобільність практично по всій земній кулі. Використання стільникового принципу побудови мережі, принципу масового обслуговування і еволюція електронних компонентів дозволили до 80-х років XX століття подолати основні технічні труднощі, що стояли на шляху загальнодоступного використання систем стільникового зв'язку. Ці нововведення дозволили створити досить технічно та економічно ефективні ССЗ, що забезпечують масову доступність абонентів, завдяки відносно невисоким тарифам на послуги мобільного зв'язку.

Основними структурними елементами сучасної ССЗ є такі (рис. 1): зона обслуговування (ТО), базові станції (БС), стільники, центральна станція (КС) – комутаційний і сервісний центр, з'єднувальні лінії (СЛ), пересувні абонентські станції (АС або МС) [8, 9, 11].

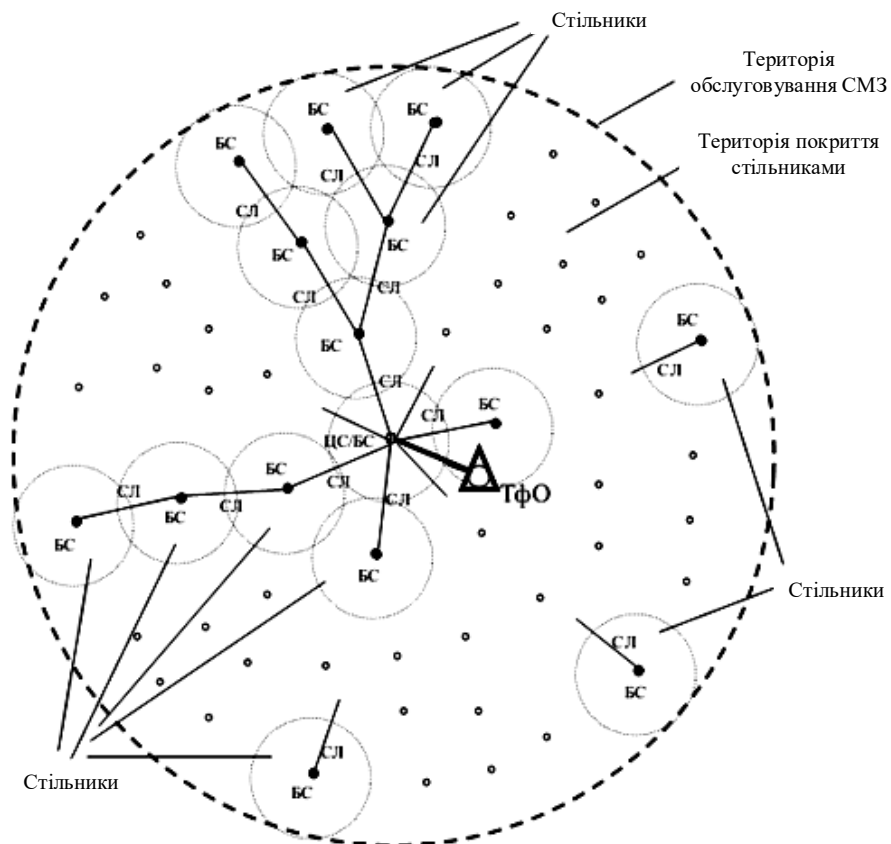


Рисунок 1.1 – Загальна будова системи стільникового радіозв'язку

Радіопокриття БС утворює місцеві зони обслуговування - осередки, з яких складається покриття всієї території. БС всіх стільників мають приймально-передавальні антени з круговою діаграмою спрямованості і з'єднані за допомогою сполучних ліній з ЗЛ, який підключається до інших мереж стільникового зв'язку через комутовану телефонну мережу загального користування (ТМЗК). Основна функція ЗЛ полягає в маршрутизації та контролі всього обсягу вхідних та вихідних повідомлень абонентів (трафіку).

Вільне переміщення абонента між комірками забезпечується процедурою передачі (управління абонентом, ретрансляційна передача абонента). Ця процедура також контролюється ЗЛ. При перенесенні АС в зону обслуговування іншої стільникової мережі активується процедура роумінгу - тимчасовий перехід абонента під контроль гостьової мережі. У цій мережі абонент автоматично реєструється в спеціальній базі даних – гостьовому реєстрі. Домашня мережа отримує сповіщення про роумінг абонента.

ЦС безперервно контролює підключення абонента та стягнення плати за послуги зв'язку за допомогою білінгової системи – автоматичної білінгової системи. Різні режими роботи цієї системи визначають певні режими зарядки (тарифні плани) для кожного абонента стільникової мережі.

Конструкція стільникової мережі

Бурхливий розвиток мобільних радіомереж спостерігається у всьому світі. Активно розвиваються мережі стільникового зв'язку, транкінгу, пейджингового зв'язку, а також абонентські мережі радіодоступу. Активне зростання числа засобів радіозв'язку робить актуальним завдання ефективного використання радіочастотного спектра (РЧС) і, як наслідок, завдання побудови систем, що дозволяють оптимально планувати мережі радіозв'язку.

У процесі проектування мережі стільникового зв'язку складається частотно-територіальний план, який найбільш повно охоплює ту територію, в якій планується діяльність ССЗ, визначає місця розташування базових станцій і розподіляє виділені частотні канали між осередками. Від ефективності цього процесу залежить якість обслуговування клієнтів, надійність і вартість

майбутньої мережі зв'язку. Для зниження капітальних витрат частотно-територіальний план повинен бути оптимізований, т. Е. Необхідно розробити план, що забезпечує задану зону обслуговування, пропускну здатність мережі, необхідну якість обслуговування при мінімальній кількості використовуваних базових станцій і частот.

Для радіомереж характерний наступний набір істотних ознак. Це найбільш динамічно розвивається область науки і техніки, що призводить до швидкого збільшення обсягу інформації і короткого терміну служби моделей, що випускаються; різноманітні системи і пристрої різного функціонального призначення; спільне використання широкосмугових і вузькосмугових сигналів; широкий діапазон робочих частот, що використовуються в радіомережах; різноманітні методи та пристрої для генерації, передачі, розподілу, прийому та обробки сигналів; різноманітні методи схемотехнічної реалізації перетворень сигналів, що використовуються в радіомережах; широке використання новітніх досягнень інформатики, радіо- та мікроелектроніки, в тому числі застосування мікропроцесорів і цифрової обробки сигналів; складність і велика кількість перетворень сигналів і, як наслідок, орієнтація на використання великих і надвеликих інтегральних мікросхем; високі вимоги до параметрів якості телекомунікаційних систем і пристроїв [7]. У 1993 році Пол Хартман представив план повторного використання частот для стільникових радіомереж. Він виділив 12 груп частот для групи з 4 базових станцій. Ці ж частоти повторно використовувалися іншими групами базових станцій. Кожна базова станція обслуговує 3 шестикутні комірки з використанням 3 груп антен, розташованих на відстані 120 градусів одна від одної (рис. 1.2) [15].

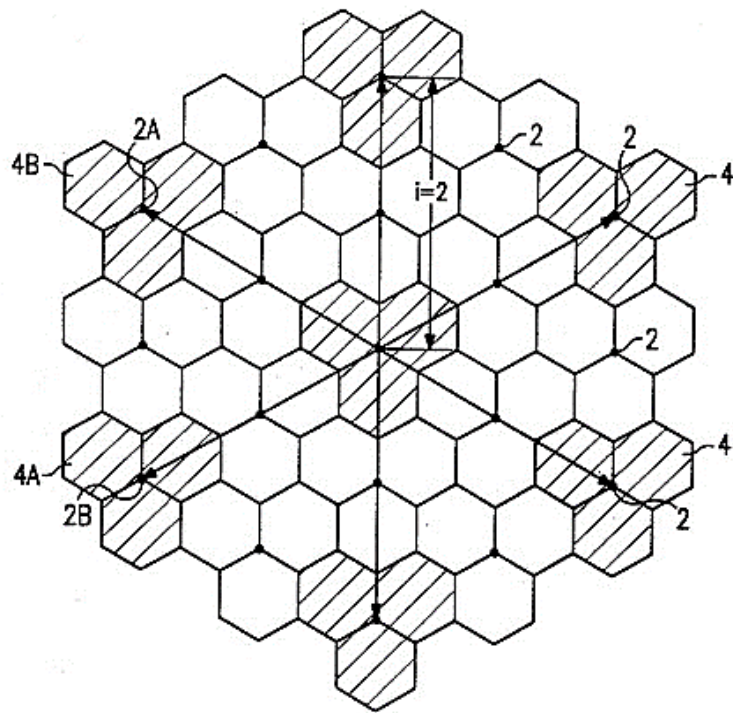


Рисунок 1.2 – Обслуговування клітин БС

У 1994 р Р. Мейден запропонував метод і механізм динамічного розподілу навантаження каналу зв'язку в секторних мережах стільникового зв'язку [113]. У таких мережах БС мають антени, розділені на сектори, кожен сектор яких характеризується шириною і довжиною променя. Навантаження каналу регулюється звуженням променя першого сектора перевантаженої комірки і відповідним розширенням променя другого сектора найближчої базової станції, а також передачею на неї постраждалих абонентів. Існує також альтернативний метод, який використовується в мережах з всеспрямованими антенами. У ньому навантаження каналу розподіляється за рахунок зменшення потужності найближчої до перевантаженої комірки антени, якщо перевантаження відбувається через перешкоди. Потім абоненти перевантаженої комірки переводяться на сервіс більш підходящої БС.

Існує підхід до побудови стільникових мереж з частотним планом і зниженням міжканальних перешкод, запропонований П. Ра [12]. Стільникова радіомережа включає в себе сукупність осередків, що межують один з одним в даній області, кожна клітина включає в себе певну кількість секторів,

згрупованих в кластери. Кожному кластеру призначається набір системних частот таким чином, що кожна клітинка в кластері має підмножину частот, таку, що існує N груп об'єднаних клітинок, що складаються з однієї клітинки з кожного кластера. Кожному сектору присвоюється частота з відповідної підмножини. Це зменшує перешкоди та покращує якість обслуговування та пропускну здатність мережі.

У 1995 р Д. Сміт запропонував набір обладнання, необхідного для забезпечення функціонування клітини [13]. Такий комплект включає в себе передавач, який виступає в якості першого джерела сигналу, а також 2 суматора сигналу, налаштованих на першу і другу частоти. Далі йде пристрій перемикачів частоти, що підключається до передавача і суматорів. У деяких реалізаціях кожен суматор може включати резонатор для відділення одного джерела сигналу від іншого.

У 1997 р Д. Донер представив удосконалений план повторного використання частот в бездротових телекомунікаційних системах [9]. Його ідея полягає в поділі всіх доступних частот на 6 груп і використанні БС з шістьма спрямованими антенами (по 60 градусів кожна). Кожній клітинці присвоюється дві групи частот, які розподіляються між секторами так, щоб два сусідніх сектора не мали однакової частоти. При виділенні частот для МК, розташованого в зовнішній частині сектора, передбачається уникнути призначення частоти, яка вже використовується в сусідній осередку. Це гарантує мінімальний рівень перешкод навіть без використання спеціальних технологій кодування.

Існує безліч методів покриття області сигналом з урахуванням доступної ширини каналу і розподілу частот. Один з таких методів був запропонований Л. Фішером в 2000 р [100]. Всі осередки діляться на кластери (не менше 2), як мінімум в одному кластері повинні використовуватися антени з поворотними пристроями, частота каналу пов'язана з кутом повороту антени.

У 2001 році Лаун Цінь удосконалив методи побудови стільникових мереж з високою пропускну здатністю за рахунок збільшення числа секторів і чергування призначень каналів. Він запропонував використовувати

вузьконаправлені осередки з чотирма променями (4 антени по 60 градусів на кожній базовій станції, розділені 90 градусами), що дозволило оптимізувати зону покриття, знизити перешкоди і отримати коефіцієнт повторного використання 2 [11].

У 2004 р М. Гілберт розробив метод динамічного розподілу ресурсів в мережах передачі даних [10]. У запропонованій ним схемі контролер ресурсів виділяє частину можливостей системи на розрахунок шляху прийому і передачі даних. Схеми передачі та обсяги даних у мережі контролюються мережевим процесором. Виділені ресурси повертаються в загальний пул після розрахунку шляхів. Для підвищення ефективності використання можливостей мережі використовується система штучного інтелекту, яка прогнозує її майбутні потреби.

В даний час серед безлічі різних методів частотно-територіального планування мереж радіозв'язку можна виділити наступні основні і широко використовувані методи:

- метод, заснований на історії гомогенних мереж передавачів;
- метод, заснований на теорії графів;
- комп'ютерні методи;

Мережа базових станцій, отримана в результаті використання методу однорідної мережі, являє собою геометрично правильну сітку на поверхні Землі. Однак реальні мережі передавачів не мають однакової геометрично правильної форми і їх технічні характеристики відрізняються від теоретичних. Ці відхилення знижують ефективність гомогенного планування мережі. Практичну цінність при застосуванні цього методу представляють результати планування використання радіочастотного спектра при призначенні частотних каналів передавачам системи зв'язку.

Найчастіше метод, заснований на теорії графів, використовується в частотно-територіальному плануванні ССЗ. При цьому сукупність передавальних станцій радіомережі представляється у вигляді набору вершин графа. Станції, які можуть створювати неприпустимі перешкоди в зонах

обслуговування, з'єднуються між собою краями. Набір обраних частотних каналів представлений у вигляді набору кольорів. У цьому методі задача планування радіомережі зводиться до узагальненої задачі розфарбовування графів, обмеженої деякими дисковими (обмеженими ребрами) графами. Деякі підзадачі розфарбовування графів мають розв'язки з поліноміальним часом, але відомі розв'язки задачі частотно-територіального планування обмежені лише окремими варіантами, придатними для практичного застосування [5].

Планування мереж стільникового зв'язку неможливе без використання комп'ютерних технологій і спеціальних програмних комплексів [4, 5]. Це пов'язано з необхідністю обробки і візуалізації великих обсягів просторової інформації в процесі проектування. Використанням геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють збирати, зберігати, обробляти, отримувати доступ і відображати просторово узгоджені дані та електронні карти місцевості. Сучасні підходи до побудови програмних засобів дозволяють створити систему проектування, організовану у вигляді окремих компонентів, центральним з яких є ядро ГІС і взаємодіють за допомогою абстрактних стандартизованих інтерфейсів. Програмні продукти, що використовуються при плануванні, і їх методи мають особливе значення і будуть розглянуті в наступних розділах.

Крім розглянутих методів частотно-територіального планування, важливу роль в проектуванні мережі радіозв'язку відіграють методи планування зон обслуговування. Існує два основних способи поділу зони обслуговування на зони:

- статистичний метод, в якому використовуються статистичні параметри поширення сигналу;
- детермінований метод, при якому вимірюються або обчислюються параметри сигналу для кожної конкретної області.

При використанні статистичного методу вся зона обслуговування ділиться на зони однакової форми. Розміри цих зон, відстані між ними і вплив один на одного визначаються за допомогою статистичних законів поширення радіохвиль.

Детермінований метод є більш кращим і оптимальним, так як передбачає ретельне вимірювання або розрахунок характеристик системи. При цьому враховується рельєф місцевості для оптимального розташування БС і можливості використання спрямованих антен. Недоліком цього методу є його складність і необхідність використання спеціальних програмних систем і ресурсомісткого моделювання.

Радіомоніторинг є складовою частиною державного управління використанням радіочастотного спектра та міжнародно-правової охорони присвоєння (призначення) радіочастот або радіочастотних каналів.

Система радіомоніторингу, як елемент системи управління радіочастотним спектром (РФС), забезпечує оцінку, вимірювання та контроль параметрів випромінювань РЕА та систем радіозв'язку, окремих РЕА та високочастотних пристроїв (ВЧП), джерел промислового випромінювання, пошуку джерел перешкод та незаконно експлуатованих РЕА та ВВП.

До об'єктів радіомоніторингу належать [7]:

- мережі та системи радіозв'язку, що функціонують на підставі Дозволів на використання радіочастот або радіочастотних каналів у діапазонах частот, виділених Рішеннями Державного радіочастотного комітету;
- смуги частот, визначені чинними Рішеннями ДКРФ з встановленими умовами використання;
- об'єкти, об'єднані в однорідні групи з єдиним адміністративним управлінням, умови застосування яких визначаються Рішеннями ДКЗФ;
- окремі РЕА та СНП;
- джерел промислових радіоперешкод (ІРІ), умови застосування яких визначені Нормами промислових радіоперешкод.

Предметом радіомоніторингу є електромагнітне випромінювання об'єктів радіомоніторингу.

Документи Міжнародного союзу електрозв'язку містять рекомендації щодо структури та функцій системи радіомоніторингу національного рівня та визначення мінімального рівня вимог до сучасної РМС [12, 13].

Метою національних систем моніторингу спектру є отримання достовірних даних про стан використання спектру в майже реальному часі шляхом вимірювання характеристик РЗЕ випромінювань об'єктів контроль, необхідний і достатній для забезпечення управління використанням радіочастотного спектра, включаючи дотримання умов електромагнітної сумісності (ЕМС).

Параметри, що підлягають радіомоніторингу: частота, смуга частот, рівень сигналу, напруженість поля і щільність потоку потужності, параметри модуляції, параметри небажаного випромінювання, координати місць установки джерел іонізуючого випромінювання і висоти їх підвісів, заповнюваність спектра, параметри зони покриття, параметри якості обслуговування.

У багатьох країнах для розширення функціональних можливостей системи радіомоніторингу (РМС) використовуються геоінформаційні системи з відображенням стану електромагнітного середовища.

При плануванні роботи ДРЦ використовується гнучкий підхід, що передбачає більше охоплення районів з високою щільністю населення і менше покриття територій з низькою щільністю населення (сільські місцевості).

Розвиток систем радіомоніторингу в різних країнах рухається в бік пошуку шляхів підвищення ефективності за рахунок ієрархічної структури РМС, гнучкого планування моніторингової діяльності, зменшення кількості стаціонарно обслуговуваних станцій моніторингу та заміни їх безпілотними та мобільними станціями, використання ГІС та їх використання при плануванні діяльності з радіомоніторингу, використання аутсорсингу, партнерства з власниками мереж радіозв'язку або інфраструктури тощо.

Проблема синтезу оптимальної архітектури мережі

Одним з найбільш складних і важливих етапів розгортання ССЗ є проектування, так як на цьому етапі побудова мережі повинна бути максимально наближена до критерію оптимальної економічності [10]. На цьому етапі визначаються місця установки БС і розподіляються частотні канали між осередками (з урахуванням принципу повторного використання частоти) для

забезпечення зв'язку з заданою зоною з необхідною якістю і мінімальними витратами на інфраструктуру (мінімальна кількість БС). Таке завдання дуже складне, оскільки, з одного боку, занадто часте розміщення базових станцій економічно не вигідно, з іншого боку, при рідкісному розташуванні базових станцій можуть з'явитися необслуговувані ділянки території. Крім того, завдання ускладнюється складністю аналітичної оцінки характеристик сигналу (поширення сигналу, розрахунків потужності), а також нерівномірністю руху в межах обслуговуваної зони.

Під час розробки проекту необхідно виконати великий обсяг обчислень, що вимагають інтенсивного використання обчислювальних засобів, так як архітектура і параметри мережі істотно залежать від умов місцевості (рельєф місцевості, характеристики будівлі і т.д.) [7]. Таким чином, проектування починається зі створення електронної карти території – перенесення на комп'ютер топографічного плану місцевості з усіма необхідними для складання проекту параметрами і характеристиками. Потім розробляється попередній план розташування БС і мережі стільникового зв'язку з урахуванням характеристик планованого до використання обладнання і результатів приблизної оцінки енергетичного балансу. Потім, використовуючи обрані моделі поширення радіохвиль і характеристики місцевості для отриманої схеми, задаються параметри електромагнітного поля в межах зони обслуговування, що дає можливість оцінити якість покриття. Для цієї ж схеми використовується частота оцінюється територіальний план (розподіл частот по осередках відповідно до принципу повторного використання частоти), а також трафік і пропускна здатність по характерних ділянках і мережі в цілому. Процес проектування ітеративний, і якщо план мережі не відповідає вимогам щодо покриття, трафіку або пропускної здатності, він коригується, і всі перераховані вище розрахунки виконуються знову для нового плану.

Також в процесі проектування мережі обов'язковими є проведення експериментальних вимірювань характеристик електромагнітного поля, за результатами яких коригується схема мережі. Необхідність експериментальних

вимірювань, а також їх обсяг і частота повторень визначається виходячи з досвіду проектувальників стільникових мереж. Остаточна оцінка якості проекту проводиться вже на етапі введення мережі в експлуатацію, на якому її коригування і доопрацювання також неминучі, особливо на самому початку робіт, коли проводиться настройка і оптимізація мережі. Насправді цей етап роботи виявляється одним з найбільш трудомістких. Для поліпшення якості мережі проект допрацьовується в міру його розвитку і вдосконалення.

Характеристики базових станцій визначають загальну якість послуг, що надаються мережею зв'язку. При плануванні мережі БС вирішуються такі задачі: забезпечення радіопокриття району надання послуг зв'язку; побудова мережі, що забезпечує необхідну пропускну здатність для обслуговування створюваного абонентами трафіку з прийнятним рівнем завантаженості; Оптимізація вирішення перерахованих вище завдань (з використанням мінімальної кількості підсистем і елементів мережі) протягом усього життєвого циклу мережі.

Протягом усього життєвого циклу мережі постійно змінюється кількість абонентів, обсяг трафіку і його розподіл по обслуговуваній площі. Крім того, спостерігаються сезонні (періодичні) зміни обсягу трафіку та його географічного розподілу. Архітектура мережі BS повинна адаптуватися до змін, що відбуваються, тому її планування є безперервним процесом. Його можна розділити на кілька етапів [56]:

- планування радіопокриття;
- планування потужностей
- планування частоти;
- аналіз та оптимізація мережі.

Всі етапи проектування взаємопов'язані, тому такий поетапний поділ багато в чому умовний. Послідовність етапів планування мережі БС показана на рисунку 3.

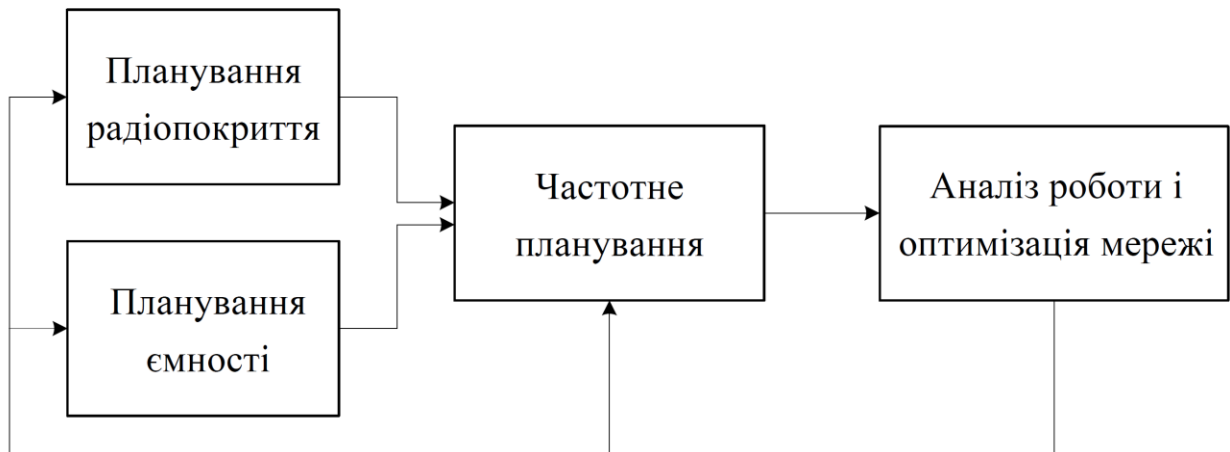


Рисунок 1.3 – Етапи проектування мережі БС

Процес проектування мережі стільникового зв'язку можна розділити на наступні логічні етапи [15]:

- Отримання вихідних даних.
- Калібрування математичної моделі поширення радіохвиль на основі вимірювань напруженості поля в найбільш характерних точках зони обслуговування мережі.
- Побудова першого наближення радіомережі.
- Зв'яжіть місця розгортання базових станцій, визначені мережевим планом, з урахуванням рельєфу місцевості та ітеративної оптимізації з широким використанням програмного забезпечення, яке підтримує синтез мережі та аналіз продуктивності.

Для здійснення планування необхідно надати такі вихідні дані, що відображають загальні характеристики мережі зв'язку: кількість і частоти дозволених радіоканалів; мережевий план із зазначенням бажаних місць розташування БС, які відповідають вимогам щодо наявності ліній зв'язку з АВР загального користування, електропостачання, можливості розміщення обладнання та встановлення антен тощо.

Очевидно, що на результати планування істотно впливають системні чинники, що підвищують складність і неоднозначність вирішення проблеми синтезу мережі радіозв'язку.

1.2. Програмні пакети для планування радіомережі

У зв'язку з різноманіттям і складністю завдань моделювання і проектування бездротових мереж важко покластися на одну універсальну модель для надання повного набору функцій, необхідних для вирішення всіх цих завдань. Тому в даний час існує кілька спеціалізованих типів автоматизованих комп'ютерних систем для аналізу та оптимізації характеристик бездротових мереж, для кожного з яких характерні свої особливості використовуваних моделей [58, 28, 61, 8, 118]. Серед них слід виділити 4 ключових види:

1. Системи частотного і територіального планування бездротових мереж; використовуються на етапі розгортання нових або модернізації існуючих бездротових мереж різного призначення для оптимального підбору місць розташування і складу обладнання приймально-передавальних станцій; Їх особливостями є:

- Використання електронних географічних карт для точної прив'язки моделі мережі до місцевості;
- використання строгих моделей поширення електромагнітних хвиль у каналах зв'язку;
- широкий діапазон розрахункових характеристик;

Системи, що забезпечують вирішення проблем електромагнітної сумісності бездротових мереж; використовуються, як і перші, на етапі розгортання нових або модернізації існуючих бездротових мереж для різних цілей з метою узгодження їх параметрів з параметрами інших мереж з метою мінімізації взаємних перешкод. Для них характерні:

- можливість підключення до баз даних з розташуванням і складом приймально-передавального обладнання всіх радіоб'єктів, що функціонують в регіоні, що розглядається;
- можливість підключення приймально-передавального обладнання різних виробників до баз даних параметрів;

- Використання електронних географічних карт для точної прив'язки моделі мережі до місцевості;
- використання строгих моделей поширення електромагнітних хвиль у каналах зв'язку;
- розрахунок характеристик різних видів перешкод та оцінка їх впливу на параметри мережі;

Системи моніторингу якості існуючих мереж; використовуються для вимірювання та подальшого аналізу характеристик мережі в реальних умовах її функціонування; У системах такого типу забезпечується:

- обмін інформацією з базами даних вимірювань реальних параметрів мережі;
- можливість порівняння результатів розрахунку та експерименту і коригування параметрів мережевої моделі за його результатами;

Системи, призначені для оптимізації принципів передачі інформації та параметрів обладнання розроблюваних мереж; У таких системах:

- Немає необхідності прив'язувати модель мережі до конкретного місця
- повинна бути передбачена можливість перевірки працездатності системи в різних умовах, в результаті чого використовуються статистичні моделі поширення електромагнітного сигналу;
- Є можливість задавати різні алгоритми роботи мережі.

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) рекомендує використовувати для аналізу технічних аспектів роботи мережі такі параметри: ймовірність блокування дзвінка, ймовірність розриву передачі, а також час, необхідний для встановлення з'єднання між МС і БС. Перераховані комп'ютерні засоби проектування стільникових мереж враховують обмежену кількість показників якості обслуговування. Найбільш часто обчислюваною ймовірністю є ймовірність блокування дзвінка через недоступність ресурсів і ймовірність розриву з'єднання під час передачі [11].

Як видно з аналізу систем частотно-територіального планування радіомереж, всі вони мають три істотні недоліки: а) всі системи не є

кроссплатформним програмним забезпеченням, тобто їх застосування обмежене рамками сімейства ОС Windows

б) відсутня загальна задача оптимізації – оптимізація мережі зв'язку проводиться шляхом вирішення конкретних завдань і повернення до попередніх фаз планування і повного перерахунку архітектури ССЗ;

в) у всіх системах функція повністю автоматичного планування радіомережі реалізована не в повній мірі (в деяких системах реалізована тільки половина автоматичного планування частоти).

1.3. Постановка задачі дослідження

Завдання покриття території мережею базових станцій можна сформулювати так: необхідно надавати послуги в даній зоні, визначати місця установки базових станцій і підбирати їх параметри таким чином, щоб кожна точка (користувач) в зоні обслуговування отримувала досить сильний сигнал. Оскільки вартість кожної БС може залежати від місця її установки і комплектації, то рішення проблеми зазвичай полягає в мінімізації загальних витрат на розгортання системи з урахуванням надання заявлених послуг по всій зоні обслуговування.

При проектуванні мережі стільникового радіозв'язку необхідно враховувати багато аспектів, включаючи розрахунки трафіку, поширення сигналу, розташування антени, розподіл ємності, регулювання потужності та перешкоди [5, 11]. Іноді вдається знайти оптимальне рішення, яке відповідає всім критеріям. Однак найчастіше критерії суперечать один одному, і зміни одного критерію призводять до змін в інших. У цьому випадку в якості рішення буде обраний компроміс між зазначеними критеріями. У той же час інженеру-проектувальнику необхідно продумати оптимальні можливі варіанти побудови телекомунікаційної мережі.

Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу оптимізації радіомережі за рахунок її автоматизації.

Виходячи з поставленої мети, були визначені наступні завдання:

- огляд і дослідження існуючих методів проектування радіомереж;
- обґрунтування методів багатокритеріальної оптимізації для підбір оптимальних конструктивних рішень для керування мережі радіозв'язку;
- визначення критеріїв оптимальності для рішення задачі багатокритеріальної оптимізації при проектуванні радіомережі;
- дослідження, порівняння, синтез та апробація алгоритмів оптимізації, що підвищують ефективність та універсальність розв'язання оптимізаційних задач;
- розробка багатокритеріального підходу до оптимізації, придатного для автоматизації процесу проектування радіомережі;
- розробка методики планування покриття з використанням еволюційних алгоритмів;
- розробка структури комплексу програм, що реалізує запропоновані моделі та методи оптимізації для задачі проектування мереж стільникового зв'язку;

У зв'язку з відсутністю ефективних методів автоматизації процесу проектування радіомереж різних типів та оптимізації принципів їх організації та функціонування, а також відповідно до завдань дослідження була сформована наукова задача синтезу мережі радіозв'язку, яка дозволяє побудувати оптимізаційну функцію з відповідними обмеженнями, у формалізованому вигляді вона виглядатиме так:

Знайти таку мережу радіозв'язку S'' , що задовольняє початковим вимогам (обмеженням) і має значення сукупності (вектору) показників якості $K(S'')$, найкращим за безумовним критерій переваги, який має вигляд

$$K(S'') \leq K(S') \quad (1.1)$$

Якщо виконується умова (1.1), то кожний з показників якості $k_i (S'') = 1$, m оптимізованої мережі S'' не гірше оригінальної мережі S , в тому числі хоча б один з цих показників якості кращий, ніж у мережі S' .

У цьому формулюванні проблема синтезу мережі відноситься до задачі векторної (багатокритеріальної) оптимізації і полягає у виборі з декількох варіантів векторно-порівнянних рішень таких, які мережа має оптимальні значення вектора якісних показників мережі радіозв'язку [2].

Щоб знизити складність поставленого завдання, можна припустити, що за інших рівних умов, чим нижча вартість мережі, тим вона краща. Це припущення має практичне обґрунтування – якщо в процесі синтезу вдалося знизити вартість мережі на кілька відсотків, якщо мережа буде виконувати задані вимоги, то це може дати десятки і навіть сотні мільйонів рублів економії. Також важливо забезпечити оптимальне планування частоти в мережі, так як використовувані частотні групи можуть бути використані на наступних етапах розширення мережі. Тому при виконанні умов (1) в процесі синтезу мережі необхідно оптимізувати апаратні (вартість) і частотні (кількість частотних каналів, що використовуються мережею) мережевих ресурсів. Якщо в ході вирішення проблеми синтезу виявляється протиріччя між цими показниками, то один з показників якості слід перевести в розряд обмежень.

Поставлена вище задача мережевого синтезу може бути успішно вирішена тільки шляхом поєднання методів математичного синтезу, пов'язаного зі значною ідеалізацією мережі, з евристичним синтезом, під яким розуміють складний творчий процес, що полягає в пошуку прийнятних рішень на основі використання накопичених даних і інженерного досвіду.

2. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ЧАСТОТНО-ТЕРИТОРІАЛЬНИМ ПЛАНУВАННЯМ МЕРЕЖ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Загальний підхід та принципи багатокритеріальної оптимізації

Кожна проблема вибору має певні загальні елементи. По-перше, для того, щоб зробити вибір, необхідно дати набір можливих рішень (варіантів) X . Щоб був вибір, цей набір повинен включати в себе як мінімум два елементи, ніяких обмежень зверху немає.

Під вибором рішення розуміють вказівку серед допустимих рішень того, що є найкращим. Часто виникають ситуації, коли відбувається вибір не одного, а певного набору рішень, які є підмножиною множини X .

Множина варіантів $C(X)$ є розв'язком задачі вибору. Таким чином, рішення проблеми полягає в знаходженні множини $C(X), C(X) \subset X$.

По-друге, процес вибору неможливий без присутності того, хто робить цей вибір. Особа або кілька осіб, відповідальних за вибір оптимального варіанту, називаються особою, яка приймає рішення.

Як правило, вважається, що найкращим рішенням є те, яке найбільш повно задовольняє потреби особи, яка приймає рішення. У математичних термінах мета виражається як максимізація або мінімізація деякої функції, заданої на множині X . У деяких випадках розглядається відразу кілька таких функцій. Таким чином, множина числових функцій $f_1, f_2, \dots, f_m, m \geq 2$ (для багатокритеріальної задачі), визначеної на множині можливих рішень X , які називаються критеріями оптимальності або цільовими функціями (якщо розглядати багатокритеріальну задачу як сукупність окремих задач оптимізації). Перераховані функції утворюють векторний критерій

$$f_1 = (f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (2.1)$$

що приймає значення з простору критеріїв (оцінок) m -вимірних векторів

R^m , будь-яке значення $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \in R^m$ називається векторною оцінкою можливого рішення x . В завдання пошуку оптимального рішення розглядати множину можливих оцінок і множину обраних векторів. Зазвичай, між множинами X та Y можна встановити однозначну відповідність.

Таким чином постановка задачі багатокритеріальної оптимізації включає:

- множина можливих X розв'язків;
- векторний критерій f ;
- відносини переваг
- Завдача багатокритеріального вибору є в пошуку множини обраних рішень $C(X), C(X) \subset X$, враховуючи його відношення переважна основі заданого векторного критерію f , що відображає сукупність цілей особи, що приймає рішення.

2.2. Постановка задачі керування та планування на основі моделей багатокритеріального вибір

Сучасні телекомунікаційні мережі, незалежно від їх принципу організації та типу, стають все більш складними і мають велику сукупність специфічних характеристик. Нове покоління телекомунікаційних мереж використовується у величезній кількості як звичайних, так і систем реального часу. Всі ці системи мають свої набори вимог до якості обслуговування з точки зору пропускну здатності, надійності, часу відгуку, джиттера і т.д. Для забезпечення функціонування таких систем необхідно проводити довгострокове попереднє планування (проектування структури системи і постановка відносин) і короткостроковий оперативний контроль функціонування системи. Завдання оптимального планування, проектування та управління телекомунікаційною мережею включає визначення вихідного набору рішень, формування підмножини можливих варіантів системи, постановку критерію оптимальності і вибір оптимального для кожного критерію варіанту структури і параметрів

системи. Така проблема є проблемою прийняття рішення з набору доступних альтернативних варіантів і її вирішення немислимо без використання системного підходу і методів багатокритеріальної оптимізації. Ці методи використовуються протягом усього життєвого циклу мережі радіозв'язку від її створення до модернізації на етапі експлуатації.

Для формалізації завдання проектування радіомережі складається математичний опис умов експлуатації, обмежень за цими умовами, вибираються показники якості системи і критерій оптимальності. Така постановка задачі дає можливість використовувати методи моделювання та багатокритеріальної оптимізації при виборі проектних рішень [7].

Таким чином, задача планування оптимальної ССЗ в термінах багатокритеріальної оптимізації може бути представлена в наступному вигляді: необхідно вибрати такий варіант проектування стільникової мережі, який буде задовольняти сукупності вихідних даних і в той же час забезпечувати оптимальне значення вектора якісних показників K за обраним критерієм налаштування. В якості вихідних даних для проектування використовуються: передбачувана кількість абонентів мережі і обсяги трафіку, виділений діапазон частот, вимоги до якості послуг, що надаються, інформація про існуючу інфраструктуру, електронні карти місцевості і т.д.

2.3. Підбір якісних показників

Будь-яка стільникова мобільна мережа, як говорилося раніше, характеризується вектором якісних показників $k = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$.

Під показником якості мається на увазі характеристика мережі, пов'язана з її якістю монотонною залежністю – зі збільшенням показника зростає загальна якість системи за інших рівних умов. Якщо якість системи змінюється немонотонно або не змінюється при зміні параметра, то цей параметр не пов'язаний з якісними показниками і не може бути використаний для багатокритеріальної оптимізації.

При проектуванні системи завдання підбору набору якісних показників є однією з найскладніших і відповідальних. Це пов'язано з тим, що для точної і повної оцінки якості тієї чи іншої системи необхідно характеризувати її не одним числом, а сукупністю показників [12]. Практично завжди в цьому випадку виникають протиріччя між пов'язаними показниками, і поліпшення одних показників призводить до погіршення інших. Таким чином, вибір оптимального варіанту - далеко не тривіальне завдання. Наприклад, суперечать один одному такі показники: імовірність блокування P_{bl} і кількість обслуговуваних абонентів N_a , кількість БС в системі N^{BTS} і пропускна здатність ΔF і т.д.

На різних етапах проектування ССС використовують різні показники якості. Для оптимізації ССС на етапі номінального проектування зазвичай використовуються такі показники [7]:

- N_a – кількість обслугованих абонентів;
- S_0 – площа території, що обслуговується;
- $\frac{N_a}{S_0}$ – щільність обслуговуваних абонентів;
- P_{err} – ймовірність помилки;
- N_k - число частотних каналів;
- A - допустиме навантаження;
- N_{BS} - число БС;
- ΔF_c – діапазон частот БС на передачу;
- N_{aBS} - кількість абонентів, що обслуговуються однією БС;
- β – максимальна активність одного абонента в годину найбільшого навантаження;
- P_{bl} - допустима ймовірність блокування;

При проектуванні та оптимізації системи можуть використовуватися не всі зазначені показники якості, а тільки найбільш відповідні в кожному конкретному випадку.

На етапі постстартової оптимізації можна виділити наступні параметри, що

характеризують якість мережі:

- зона покриття мережі;
- пропускна здатність мережі;
- ймовірність блокування;
- відносна кількість успішних дзвінків;
- відносна кількість збоїв з'єднання;
- відносна кількість успішних передач;
- якість зв'язку.

Більшість цих показників можна виміряти тільки під час тестової експлуатації мережі, тому вони не використовуються на початковому етапі проектування.

Для вирішення проблеми оптимального проектування стільникової мережі зазвичай використовуються показники, які зводяться до стандартного вигляду – стандартизовані, безрозмірні і відповідають наступним умовам [17]:

- $k_i > 0$;
- чим менше значення k_i , тим краще система при інших рівних умовах;
- ідеальна (за цим показником) система $k_i \rightarrow 0$;

Щоб привести показники до стандартного вигляду, необхідно нормалізувати значення k_i до максимальних значень $k_{i\max}$:

$$k_{in} = \frac{k_i}{k_{i\max}}. \quad (2.2)$$

Таким чином, значення індикатора стануть безрозмірними і будуть знаходитися в діапазоні від 0 до 1.

Після цього всі показники зводяться до порівнянного вигляду, тобто їх відповідності умові мінімізації цільової функції. Для показників, що поліпшують якість системи при їх максимальному вираженні, виконується наступне перетворення:

$$k_{ic} = 1 - k_i. \quad (2.3)$$

2.4. Підбір критеріїв оптимальності

Припустимо, що система $\varphi = (u, \beta) \in \Phi_D$ визначається структурою s (сукупність елементів і зв'язків) і вектором параметрів β . Інформаційній системі повинен бути заданий набір входів X і виходів Y . Вся система може бути представлена у вигляді функції відображення $\varphi : X \rightarrow Y$. Передбачається, що в процесі проектування розробляється точний опис системи $\varphi \in \Phi$. Зокрема, при формулюванні задачі складається математичний опис умов і цілей функціонування система. Також встановлюються обмеження на умови і структуру $s \in S_D$, параметри $\beta \in B_D$ і на якісні показники системи, що визначає сукупність допустимих проектних рішень $\Phi_a = S_a \times B_a$.

Існує велика кількість способів конкретизації таких наборів, наприклад:

- Неявне визначення за допомогою обмеження в залежності від умов експлуатації, сформульованого в строгій математичній формі;
- Перерахування допустимих варіантів системи;
- Визначення формального механізму для генерування варіантів системи.

Вибір критерію оптимальності тісно пов'язаний з формалізацією поняття оптимальності. Існує два підходи до опису переваги того, хто приймає рішення, одного варіанту перед іншим: ординалістський і кардиналістичний.

Ординалістський підхід ґрунтується на введенні бінарних відношень між парами можливих рішень. У цьому випадку переваги особи, яка приймає рішення являють собою двійкові відношення R на множині Φ_D , які відображають знання особи, яка приймає рішення, про те, що рішення φ' краще, ніж альтернативне рішення φ'' : $\varphi' R \varphi''$.

Припустимо, що особа, яка приймає рішення, дотримується відносин строгих переваг ($\succ$), які є асиметричними і перехідними, і приймає рішення на

множині альтернатив Φ_D . Рішення $\varphi_0 \in \Phi_D$ називається оптимальним в тому сенсі, в якому випадки, коли інших рішень немає $\varphi \in \Phi_D$, для якого виконується відношення $\varphi \succ \varphi_0$. Множина оптимальних по відношенню $\succ$ позначається як $opt \Phi_D$. Ця множина може включати в себе або один елемент, або кінцеве або нескінченне число елементів в залежності від структури множини Φ і властивості відношення $\succ$.

Кардиналістський підхід полягає у введенні для кожної альтернативи $\varphi \in \Phi_D$ певного числа U , що відображає корисність (цінність) рішення φ . Кожна цільова функція задає відношення порядку (переваги) R (є індикатором переваги) на множині $\Phi_D(\varphi R \varphi')$, якщо виконується умова $U(\varphi) \geq U(\varphi')$. У цьому випадку може бути введена деяка скалярна функція (критерій оптимальності), оптимізація яких призведе до підбору єдиного оптимального варіанту системи.

Вибір критерію оптимальності заснований на представленні особи, яка приймає рішення оптимальності. Однак через відсутність визначеності не завжди є можливість формалізувати цільову функцію та скалярний критерій оптимальності. У такому випадку неможливо вибрати єдиний оптимальний варіант $\varphi_0 = extr [U(\varphi)]$, $U(\varphi)$ - цільова функція корисності системи. Потім, на початкових етапах планування, система характеризується набором цільових функцій:

$$f(\varphi) = (f_1(\varphi), f_2(\varphi), \dots, f_m(\varphi)), \quad (2.4)$$

що визначає вплив структури s та параметрів β варіанту системи $\varphi = (s, \beta)$ на якісні показники системи.

У цьому випадку виникає підклас більш складних проблем оптимізації рішень за якісними показниками, званих багатокритеріальністю або векторною оптимізацією. В основному постановка і рішення багатокритеріальної задачі полягає в заміні (наближенні) уявлень прийняття рішення про оптимальність системи різними оптимізаційними поняттями, які можуть бути формалізовані у

вигляді певного вектора критеріїв оптимальності (5) і така проблема може бути вирішена за допомогою ефективних процедур оптимізації.

2.5. Формування набору допустимих варіантів системи

При оптимізації інформаційних систем, представлених у вигляді їх розкладання на підсистеми, доцільно використовувати морфологічний підхід, який широко використовується при проектуванні складних систем. При цьому передбачається, що будь-який варіант системи має певну структуру, тобто складається з кінцевого числа елементів (підсистем), а розподіл функцій системи між ними може виконуватися за допомогою кінцевого числа методів.

При формуванні множини допустимих варіантів системи Φ_D необхідно враховувати обмеження, що накладаються на структуру, параметри і технічну реалізацію елементів системи і системи в цілому, а також допустимі варіанти з'єднання елементів і обмеження на значення показників якості системи. При обліку всіх цих показників виникають протиріччя у вимогах. З одного боку, бажано представити всі можливі варіанти системи в повному обсязі, щоб не упустити потенційно кращі варіанти. З іншого боку, існують обмеження, що забезпечуються величиною допустимих витрат (часу і грошей) на проектування системи.

Після визначення множини можливих варіантів системи в термінах конкретної структури обчислюються значення якісних показників, виділяється набір парето-оптимальних варіантів, який потім звужується до єдиного, найбільш кращого, варіанту.

2.6. Пошук Парето-оптимальних варіантів системи

Кожен варіант φ системи представлений у вигляді сукупності цільових функцій, що відображаються з набору допустимих варіантів Φ_D в критеріальний простір оцінок $V \in R^m$:

$$V = K(\Phi_D) = \{v \in R^m | v = k(\varphi), \varphi \in \Phi\} \quad (2.5)$$

У цьому випадку кожному варіанту φ відповідає оцінка обраних показників якості $v = k(\varphi)$ і навпаки.

В критеріальному просторі оцінок V відношенню строгої переваги з множини Φ_D відповідає відношення $\geq$. На основі аксіоми Парето для двох будь-яких оцінок $v', v'' \in V$, що задовольняють нерівність $v' \geq v''$, завжди є відношення $v' \succ v''$. А також, відношення $\varphi' \succ \varphi''$ існує для будь-яких двох варіантів системи для яких виконується нерівність $k(\varphi') \geq k(\varphi'')$. Аксіома Парето накладає певні обмеження за характером преференцій в умовах багатокритеріальної задачі.

Споживачеві хотілося б отримати найкращі значення за всіма зазначеними показниками якості, проте на практиці така ситуація зустрічається дуже рідко. Слід зазначити, що цільові функції (якісні показники) можуть бути трьох видів: нейтральні, узгоджені між собою і конкуруючі між собою. У перших двох випадках є можливість оптимізації за кожним критерієм окремо. У третьому випадку такої можливості немає і може бути досягнутий тільки узгоджений оптимум - оптимум за критерієм Парето, який має на увазі, що кожен з показників може бути поліпшений в майбутньому тільки за рахунок зниження інших якісних показників системи. Для оптимуму Парето в критеріальному просторі відповідає множина парето-оптимальних оцінок, які задовольняють наступному виразу:

$$P(V) = \text{opt } V = \{k(\varphi^0) \in R^m | \forall k(\varphi) \in V : k(\varphi) \geq k(\varphi^0)\} \quad (2.6)$$

Оптимум Парето можна знайти відповідно до виразу (2.6) шляхом повного перебору всіх можливих варіантів системи Φ_D або з використанням спеціальних методів, наприклад, вагового методу, методу робочих характеристик, методу послідовних поступок тощо.

Формальна постановка задачі оптимізації Парето не містить інформації для вибору єдиної альтернативи. У цьому випадку набір допустимих варіантів звужується до набору парето-оптимальних рішень шляхом відкидання найгірших альтернатив. Для вирішення проблеми звуження підмножини парето-оптимальних варіантів системи існує безліч різних підходів, наприклад, заснованих на теорії корисності, теорії нечітких множин, лексикографічному порівнянні.

2.7. Методи пошуку оптимальних варіантів побудови мережі

Багато методів багатовимірної оптимізації зазвичай розрізняють за типом інформації, яку вони використовують у своїй роботі [4, 16]:

- методи прямого пошуку (методи нульового порядку);
- градієнтні методи (методи першого порядку);
- методи Ньютона (методи другого порядку).

Жоден з методів цих класів не відрізняється високою ефективністю при вирішенні оптимізаційних задач різного типу. Наприклад, в ряді випадків при реалізації цих прийомів на комп'ютері може виникнути переповнення пам'яті, обчислення цільової функції може зажадати надмірного часу або може знадобитися недосяжна точність обчислень. Для задачі планування радіомережі складність полягатиме в тому, щоб представити аналітичний вираз для похідних цільової функції. Таким чином, інженеру-проектувальнику необхідно адаптувати застосовуваний метод до параметрів конкретної задачі, яку потрібно вирішити.

Методи прямого пошуку вимагають тільки значень функцій і не використовують ніякої внутрішньої моделі цільової функції. Методи, засновані на обчисленні значень функцій, можна розділити на евристичні (симплексний пошук, метод Гука-Дживса та ін.) І теоретичні (метод спряжених напрямків Пауелла). Евристичні методи реалізують процедури пошуку за допомогою

інтуїтивних геометричних уявлень, тоді як теоретичні методи базуються на фундаментальних математичних теоремах і за певних умов мають властивість збіжності.

Деякі методи прямого пошуку витримали випробування часом і є ефективними процедурами, що застосовуються на практиці. Головною перевагою цих процедур є не теоретичне доведення збіжності або швидкість збіжності, а простота виконання і доказ їх ефективності при вирішенні практичних завдань, а також відсутність складних підготовчих етапів (наприклад, обчислення першої і другої похідних).

Задачу багатовимірної оптимізації можна записати таким чином: потрібно знайти вектор $x^* = (x^*_1, x^*_2, \dots, x^*_n)$, що забезпечує мінімум функцій із заданою точністю ε використанням чисельного методу розв'язання, $x \in R^n$. В багатовимірному випадку пошук крайніх точок значно ускладнюється, так як розглянута проблема має нові сторони:

- функція $F(x)$ може набувати складну форму;
- існує нескінченна кількість можливих напрямків пошуку і, відповідно, проблема вибору напрямку; змінні $x_1, x_2, \dots, x_n$ можуть бути взаємопов'язаними; діапазон допустимих значень може приймати всілякі форми.

Як вже говорилося раніше, проектування оптимальної мережі стільникового зв'язку є багатокритеріальною задачею і для її вирішення за допомогою методів прямої оптимізації необхідно згорнути критерії за допомогою лінійного коефіцієнта. Даний метод вирішення багатокритеріального завдання простий і, в деяких випадках, досить ефективний, але має ряд недоліків, які більш детально будуть розглянуті в наступному розділі і не підходить для вирішення завдання проектування радіомережі.

Іншим ефективним методом вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації є метод дослідження простору параметрів, розроблений у 1981 році І.М. Соболев та Р.Б. Статніковим.

Для знаходження точок з допустимих і паретинних множин використання методів спрямованої оптимізації (наприклад, градієнтних) може виявитися

неефективним. Для цього класу задач доцільно використовувати методи, що дозволяють «зондувати» набір параметрів по точках у послідовності, рівномірно розподілених у паралелепіпеді параметричних обмежень

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}, j=1, r. \quad (2.7)$$

З функціональними обмеженнями записані у вигляді:

$$c_i^* \leq f_l(\alpha) \leq c_i^{**}, l=1, t, \quad (2.8)$$

де c_i^*, c_i^{**} – обмеження нормативного типу, які не можна порушувати.

Використання таких послідовностей з хорошими характеристиками однорідності і достатньою кількістю їх точок дозволяє ефективно "проглядати" простір параметрів. Це означає, що, розрахувавши значення критеріїв в цих точках, можна мати досить повну інформацію про досліджувану систему.

Вивчення простору параметрів складається з трьох етапів.

Перший етап – складання тестових таблиць, яке виконується за допомогою комп'ютера. Вибирається N пробних точок рівномірно розташованих в G . В кожній з точок розраховуються всі локальні критерії $\Phi_v(a_i)$. Для кожного з них складається таблиця випробувань в якій значення розташовуються в порядку зростання:

$$\Phi_v(a_{i_1}) \leq \Phi_v(a_{i_2}) \leq \dots \leq \Phi_v(a_{i_N}), \quad (2.9)$$

де вказані номери $i_1, i_2, \dots, i_N$ відповідних пробних точок – номери випробувань (різні для кожного v).

Другий етап – вибір критерію обмеження – передбачає втручання проектувальника (або замовника). Враховуючи почергово для кожної з таблиць (10) він повинен призначити критеріальні обмеження. Якщо ви виберете всі обмеження занадто малими, то набір допустимих точок D може бути порожньою

(тобто проблема нерозв'язна).

Третій етап, що виконується на комп'ютері, - це перевірка розв'язності задачі:

$$\Phi(P) = \min_{\alpha \in D} \Phi(\alpha), \quad (2.10)$$

де $\Phi(\alpha) = (\Phi_1(\alpha), \dots, \Phi_k(\alpha))$ – вектор критеріїв.

Зафіксуємо один з критеріїв, наприклад $\Phi(\alpha)$ і розглянемо відповідну йому таблицю (10). Нехай $s = s(v_I)$ – кількість значень у цій таблиці, які відповідають обраному критерію обмеження:

$$\Phi_{v1}(a_{i1}) \leq \dots \leq \Phi_{v1}(a_{is}) \leq \Phi_{vi}^{**} \quad (2.11)$$

Шляхом перебору доступних значень $\Phi_{v1}(a_{i1}), \dots, \Phi_{v1}(a_{is})$ при всіх v нескладно перевірити, чи є серед точок принаймні один з них, для якої справедливі одночасно всі нерівності критеріальних обмежень:

$$\Phi_v(a) \leq \Phi_v^{**}, \quad v=1, k \quad (2.12)$$

Якщо така точка існує, то множина D , визначена нерівностями (8) – (9), не є порожньою і задача (2.10) є розв'язною. В іншому випадку необхідно повернутися до другого етапу і вимагати від проектувальника (або замовника) «поступок» на призначення Φ^{**} . Якщо такі поступки вкрай небажані, ви можете повернутися до першого етапу і збільшити кількість пробних точок, щоб повторити другий етап з більшими тестовими таблицями. Таким чином, завдання на проектування ставиться і вирішується в діалоговому режимі.

Для вибору тестових точок бажано використовувати рівномірно послідовності (або сітки), розподілені в просторі параметрів з достатньо хорошими характеристиками рівномірності і максимально прості алгоритми

обчислення координат їх точок.

Процес вибору точки поступаю наступним чином. За декартовими координатами наступної точки знаходимо декартові координати точки, яка належить П:

$$\alpha = \alpha_j^* + q_{i,j}(\alpha_j^{**} - \alpha_j^*), j=1, r \quad (2.13)$$

При $\alpha = \alpha_i$ розраховуємо спроектовану систему і перевіряємо умови (2.8). Якщо вони виконані, то точка $\alpha = \alpha_i$ відбирається в якості пробної і обчислюються всі $\Phi(\alpha)$, в іншому випадку $\alpha = \alpha_i$ відкидаються.

Нехай N – кількість точок α_i . Як правило, вирішальну роль у визначенні N відіграє розрахунковий час системи. Однак при виборі параметрів машин, конструкцій і систем, призначених для серійного і масового виробництва або призначених для довгої експлуатації то будь-які (розумні) затрати часу, необхідні для підрахунку точок, є виправданими.

За результатами дослідження простору параметрів може бути побудована кореляційна матриця $\|r_{\mu\nu}\|$ де $r_{\mu\nu}$ – коефіцієнт парної кореляції критеріїв $\Phi_\mu(\alpha)$ та $\Phi_\nu(\alpha)$. Ця матриця дозволяє відносно просто для оцінити ступінь лінійної залежності між будь-якими двома критеріями. Отже, якщо в цій матриці $r_{\mu\nu} \approx 1, \mu \neq \nu$, тоді критерії Φ_μ та Φ_ν лінійно залежні. Дані її досліджень можуть допомогти конструктору в аналізі допустимого набору рішень.

Аналіз таблиць результатів тестування дозволяє:

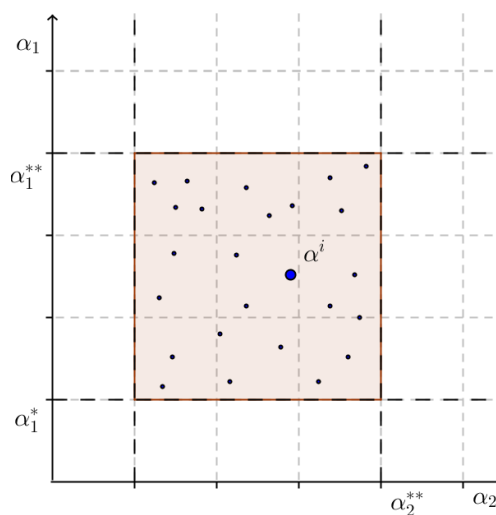
- виявити критерії, значення яких практично не змінюються;
- виявити залежні або, навпаки, суперечливі критерії;
- для визначення впливу параметрів на критерії якості і в деяких ситуаціях намагатися поліпшити значення тих чи інших критеріїв шляхом корекції параметричних обмежень визначити взаємозв'язок критеріїв між собою.

Однак до найважливіших результатів можна віднести визначення допустимих і парето-оптимальних множин рішень, їх неформальний аналіз і

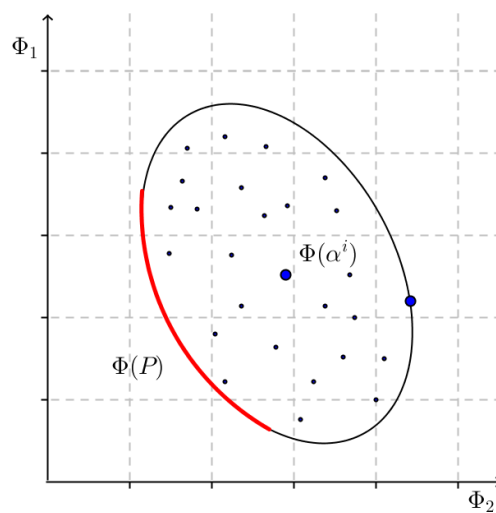
знаходження найбільш кращого варіанту проекту.

Виходячи з аналізу Парето-оптимальної множини, визначається найбільш бажаний варіант. Множина Парето важлива для виконання завдань векторної оптимізації, тому що, по-перше, проектувальнику простіше її проаналізувати, ніж всю допустиму множину, а по-друге, яку б систему переваг не використовував дизайнер при порівнянні різних векторів з допустимого діапазону, оптимальний вектор завжди належить множині Парето.

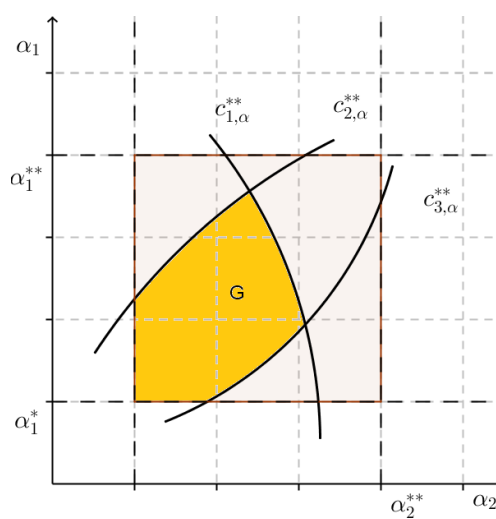
Розглянемо спрощену динаміку побудови допустимої множини. Припустимо, що ми можемо змінити два параметри (α_1 та α_2), а якість спроектованого механізму оцінюється за двома критеріями (Φ_1 і Φ_2), які залежать від параметрів (рис. 7). Критерії бажано мінімізувати. Нехай маємо можливість генерувати достатню велику кількість варіантів проектів, які представлені на рис. 7, а, б у вигляді точок (на рис. 7, б - сукупність парето-оптимальних рішень в просторі критеріїв). Через наявність функціональних обмежень (припустимо, що їх три) $c_{1,\alpha}^{**}$, $c_{2,\alpha}^{**}$, $c_{3,\alpha}^{**}$ (рис. 7, в) початкова множина варіантів в паралепіпеді параметрів стає менше. На ньому показана площа $G \subset \Pi$, що задовільняє обмеженням функціонального типу. В просторі критеріїв на рис. 7.г $\Phi(G)$ – образ G . Після визначення G замовник шукає прийнятний набір рішень D . На рис.7, е показані три кроки замовника. Першим кроком є $\Phi_{1,1}^{**}$, $\Phi_{2,1}^{**}$ і $D = \emptyset$. Замовник йде на поступку. Другий крок $\Phi_{1,2}^{**}$, $\Phi_{2,2}^{**}$ і в даному випадку знову $D = \emptyset$. Нарешті, на третьому кроці ($\Phi_{1,3}^{**}$, $\Phi_{2,3}^{**}$) виявляється $D \neq \emptyset$, $G \supset D$ (на рис. 7, д $\hat{\Phi}_1^{**}$ і $\hat{\Phi}_2^{**}$ в просторі параметрів).



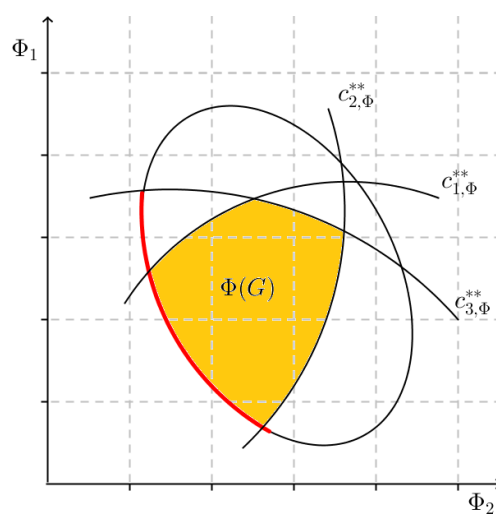
а



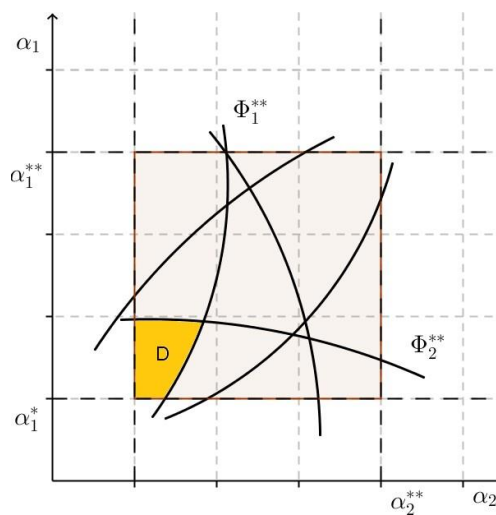
б



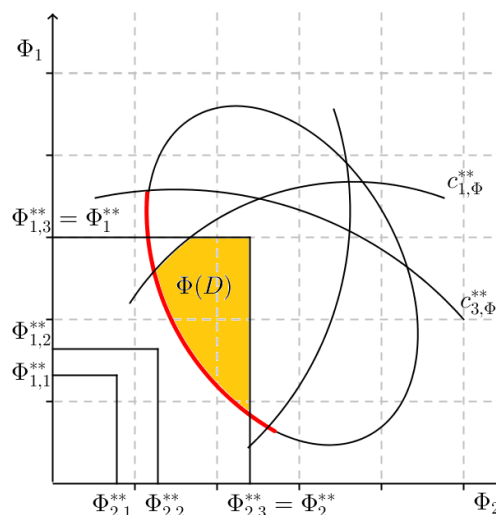
в



г



д



е

Рисунок 7 – Побудова комплексу рішень

Таким чином, розглядаючи набір D, замовник багаторазово переглядає пріоритети і змінює уявлення про важливість критеріїв. При вивченні допустимого набору як клієнт, так і проектувальник можуть враховувати фактори, які не вдалося оформити офіційно.

Як видно, перевага цього методу полягає в тому, що в ході аналізу простору параметрів надходить інформація про якість і придатність математичної моделі і її можливих коригувань. Однак такий поетапний підхід до оптимізації з постійною взаємодією між замовником і дизайнером слабо підходить для автоматизації.

Використання метаевристики

Багатокритеріальна оптимізація з використанням еволюційних алгоритмів

В даний час для вирішення проблем оптимізації з'явилося багато методів, які називаються метаевристиками – стратегії високого рівня, які керують евристикою низького рівня. Розрізняють траєкторні методи (табу-пошук, імітаційний відпал), які зберігають єдине рішення, і популяційні методи (методи мурашиних колоній, еволюційне моделювання), які зберігають кінцеву множину (популяцію) рішень.

Як вже говорилося раніше, одним з методів вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації є згортка критеріїв за допомогою лінійного співвідношення. Припустимо, експерт вважає, що вартість кінцевого варіанту в 5 разів значніше пропускну здатності мережі і в 3 рази більш значуща за надійність, тоді функцію пристосованості можна записати у вигляді наступної суми:

$$F(i)=K(i) + 1/5P(i) + 1/3C(i) \quad (2.14)$$

Очевидно, що такий підхід має ряд проблем. Перша з них - це необхідність визначення співвідношення критеріїв один до одного, що дуже складно або неможливо, якщо критерії нелінійні. Крім того, в деяких випадках розгляд зваженої суми не завжди показує межу Парето. Для прикладу розглянемо

випадок, коли критерії просто підсумовуються. Розглянемо два рішення, рішення А близьке до межі, тому краще, але сума критеріїв для рішення В буде більшою, і він буде обраний у функції пристосованості (рис. 8)

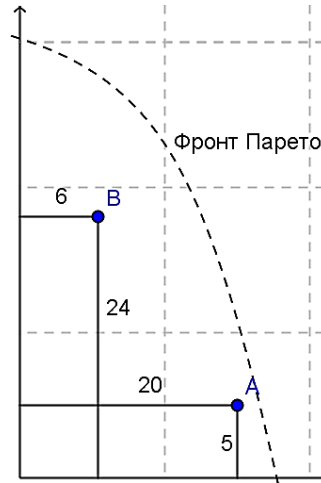


Рисунок 8 – Рішення на кордоні Парето

Для вирішення першої задачі можна відмовитися від складання лінійної комбінації і розглянути всі критерії як непорівнянні функції. При цьому переваги встановлюються на порядок критеріїв (один варіант мережі оголошується найкращим, якщо, наприклад, значення надійності вище, ніж у іншого, якщо вони рівні, то розглядаються інші критерії). Таким чином, можна скласти алгоритм проведення процедури відбору за допомогою турніру. Визначимо функцію критерію значення повернення якості індивіда за заданим критерієм. Алгоритм отриманого турнірного відбору можна записати таким чином:

Best:=випадкова особина з популяції;

$O := \{O_1, \dots, O_n\}$; // список критеріїв розташовується в порядку від найважливіших до найменш важливих.

t :=розмір турніру, $t > 1$;

Цикл по i від 2 до t :

Next:=випадкова особина з популяції;

Цикл на j від 1 до n :

Якщо $Criterion(O_j, Next) > CriterionValue(O_j, Best)$, то:

Best:=Next;

Закінчення внутрішнього циклу;

Якщо CriterionValue(O_j ,Next)<CriterionValue(O_j ,Best), то:

*Закінчення внутрішнього циклу; *

Результат:=Best;

Цей алгоритм можна вдосконалити, додавши голосування: особа буде вважатися найкращою, якщо вона перевершить інших за більшою кількістю критеріїв.

Для більш точної оцінки рішень в багатокритеріальному сенсі в пошукових алгоритмах слід використовувати поняття домінування Парето. Найпростішим способом є використання оператора відбору турнірів на основі домінування Парето. В цілому такий алгоритм можна записати так:

P:=популяція;

P_a:=випадкова особина з P;

P_b:=випадкова особина з P;

Якщо в P_a домінує P_b, то:

Результат:= P_a;

В іншому випадку, якщо P_b домінує над P_a то:

Результат:= P_b;

В іншому випадку:

Результат:= випадково вибрана особина P_a або P_b;

Якщо обидві особини не домінують один над одним по Парето, то вони однаково цікаві дизайнеру, але з метою оптимізації необхідно вибрати тільки одне. Для вирішення цієї проблеми введені поняття рангів кордону Парето і розрідженості. Особи, розташовані на межі, присвоюється ранг 1. Якщо цих особин видалити з популяції і перерахувати межу, то її особинам буде присвоєно 2 ранг і так далі (рис. 9).

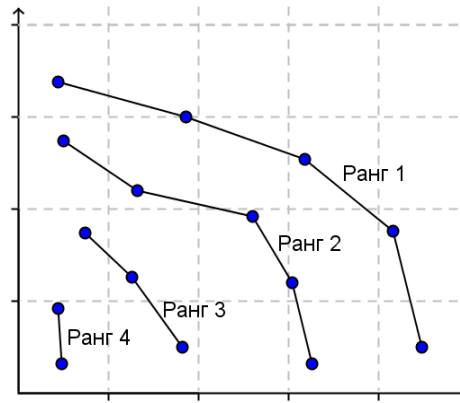


Рисунок 9 – Ранги межі Парето

Після обробки всіх особин отримані ранги можна використовувати як функцію пристосованості (чим нижче ранг, тим краще):

$$Fitness(i) = \frac{1}{1 + РангГраниціПарето(i)} \quad (2.15)$$

Для осіб з однаковим рангом можна вимірювати відстані між ними. Для цілей оптимізації необхідно, щоб особини були рівномірно розподілені по межі. Припустимо, що особина знаходиться в розрідженій зоні, якщо найближча особина такого ж рангу знаходиться не дуже близько. Так для особини В розрідженість вище, ніж для А, так як $A_1 + A_2 < B_1 + B_2$ (рис. 10). Таким чином, необхідно визначитися з турнірним відбором таким чином, щоб спочатку відбиралися індивіди за рангом Парето, а неоднозначні ситуації вирішувалися за допомогою розрідженості:

P :=популяція з обчисленими рангами межі Парето;

$Best$:=випадкова особина з популяції;

t :=розмір турніру, $t \geq 1$; i цикл від 2 до t ;

$Next$:=випадкова особина з популяції;

Якщо $ParetoBoundRank(Next) < ParetoBoundRank(Best)$, то:

$Best := Next$;

В іншому випадку

Якщо $ParetoBoundRank(Next) = ParetoBoundRank(Best)$:

Якщо $\text{розрідженість}(\text{Next}) > \text{Розрідженість}(\text{Best})$:

$\text{Best} := \text{Next}$;

$\text{Результат} := \text{Best}$;

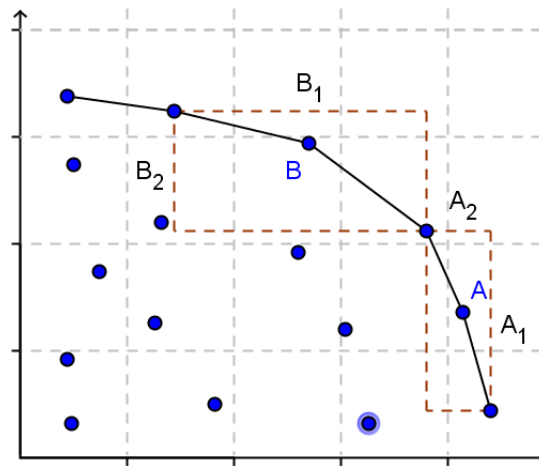


Рисунок 10 – Розрідженість

Іншим параметром, який можна використовувати для розрахунку пристосованості, є сила Парето, яка вказує на кількість особин, які домінують у даної особини. Однак сила не обов'язково вказує на те, наскільки близько особина знаходиться до межі, і особина на межі може бути не таким сильним, як інші особини (рисунок 11).

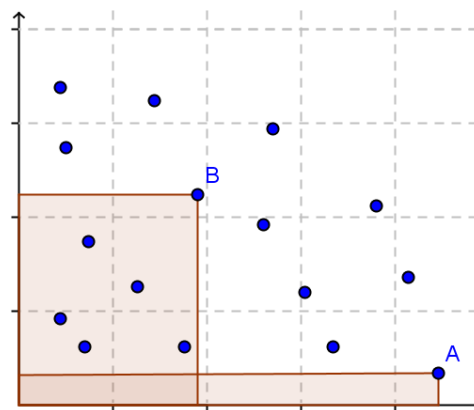


Рисунок 11 – Сила Парето

Для виключення подібних випадків можна використовувати протилежне поняття - слабкість, що визначається як число особин, що домінують над даним. Більш вдалою характеристикою буде загальна слабкість: сумарна загальна сила

всіх індивідів, домінуюча дана:

$$\text{Слабкість}_{\text{заг}} = \sum \text{Сила}(g), \quad (2.16)$$

де G - група особин, що домінують i .

Для отримання оптимального результату необхідно, щоб слабкість була якомога меншою, тоді функцію пристосованості можна записати так:

$$\text{Fitness}(i) = \frac{1}{1 + \text{РангГраниціПарето}(i)} \quad (2.17)$$

Введемо поняття попередньої пристосованості:

$$G_i = \text{Слабкість}_{\text{заг}}(i) + \frac{1}{2 + d_i}, \quad (2.18)$$

де d_i – відстань до найближчого сусіда.

Таким чином, якщо даний індивід далекий від інших, то значення пристосованості зменшується для збільшення різноманітності популяції.

Алгоритм SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) на кожній ітерації складає архів особин, розташованих на межі Парето.

Розмір архіву фіксований і становить p . Якщо особин не вистачає, то беруться наступні. Якщо особин занадто багато, то ті, у яких мінімальна відстань до найближчого сусіда, відбраковують. Таким чином, ми отримуємо архів з особами з кордону Парето, розташованими далеко один від одного і від інших осіб. Після заповнення створюється нова популяція шляхом схрещування особин з архіву:

m :=чисельність популяції;

a :=розмір архіву;

P :=популяція $\{P_1, \dots, P_m\}$;

$A := \{\}$ архів;

Повторити:

РозрахунокПристосованості (P);

$P := P \cup A$;

НайкращаМежа := P межа;

$A := \text{ArrayFillSPEA2}(P, a)$;

$P := \text{Перехрещення}(A)$

до тих пір , поки *BestBoundary* не стане досконалим або до кінця заданого часу;

Результат := *BestBorder*;

2.8 Оптимізація проектних рішень при плануванні радіомереж

На рисунку показано еволюційне представлення бездротової мережі для використання в SPEA2. У еволюційному алгоритмі передавачі БС і зони їх обслуговування представлені у вигляді особин, а сукупність передавачів - бездротова мережа в цілому - популяція. Еволюційне картування радіомережі – це ієрархія, в основі якої знаходяться хромосоми, що кодують характеристики передавачів – місце розташування, потужність, ємність тощо. Рівнем вище - особини, а ще вище - популяції, які відображають альтернативні версії архітектури системи. Вершиною ієрархії є метапопуляція, сукупність всіх популяцій в будь-який момент часу (рис. 12).

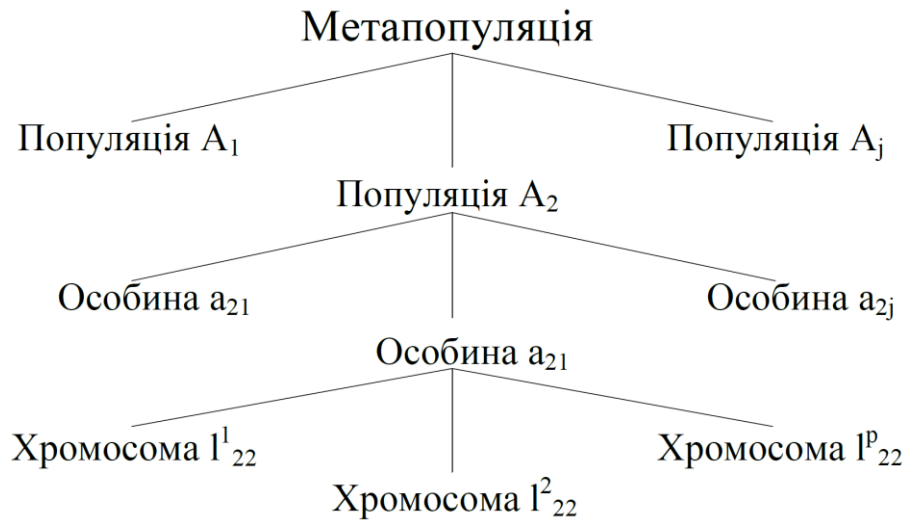


Рисунок 12 – Структура еволюційного представлення бездротової мережі

У загальному випадку схема знаходження рішення буде виглядати так (рис. 13):

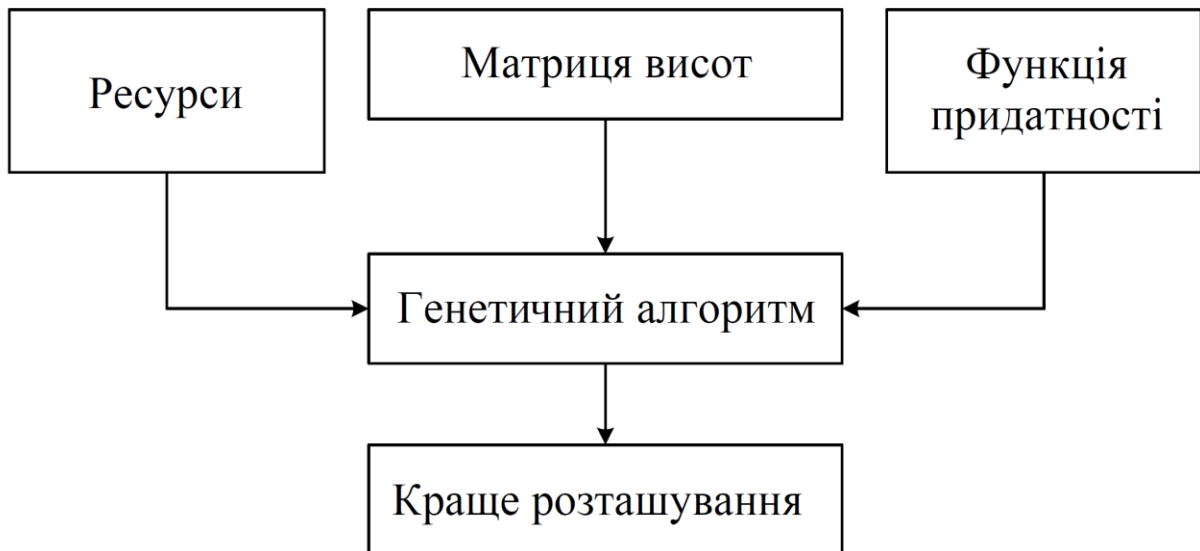


Рисунок 13 – Загальна схема отримання оптимального рішення

2.9 Висновки

У другому розділі детально була розроблена постановка задачі оптимізації мереж радіозв'язку на прикладі мереж стільникового зв'язку (ССЗ), визначені критерії оптимальності для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації.

Проведено аналіз різних підходів до пошуку оптимальних варіантів побудови мережі, включаючи прямі методи, метод дослідження простору параметрів та використання метаевристики.

Були отримані наступні результати:

1. Процес проектування радіомережі був розділений на 3 взаємопов'язаних етапи: планування радіопокриття, планування потужностей і планування частот;

2. Сформульовано задачу синтезу архітектури мережі в термінах векторної (багатокритеріальної) оптимізації, яка полягає у виборі з декількох варіантів векторно-порівнянних рішень такого, в якому мережа має найкращі значення вектора показників якості;

3. Було виділено два підходи до опису переваги прийняття рішення одного варіанту перед іншим: ординалістський і кардиналістичний;

4. Формалізовано процес пошуку оптимальних варіантів побудови ССЗ та запропоновано методи багатокритеріальної оптимізації на основі оптимальності Парето для вирішення завдань короткострокового та довгострокового планування та проектування телекомунікаційних мереж різних типів, визначено критерії оптимальності та якісні показники системи.

5. Вперше запропоновано та обґрунтовано методи вибору оптимальних варіантів проектування радіомережі з урахуванням комплексу якісних показників.

В якості методу пошуку оптимального варіанту мережі були обрані метаевристики, а саме еволюційне моделювання і еволюційні алгоритми, як найбільш підходящі для автоматизації процесу проектування і не вимагають втручання осіб, що приймають рішення на кожному етапі.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

3.1. Визначення параметрів конструкції

На етапі планування мережі мобільного зв'язку необхідно визначити, які параметри будуть встановлені замовником (вихідні дані), а які будуть розраховані відповідно до обраної методики розрахунку. Зазвичай в якості вихідних даних використовуються такі показники:

- S_0 – площа зони обслуговування, км^2 ;
- β – активність одного абонента за годину з найбільшим навантаженням, Ерл;
- N_a – кількість абонентів у проєктованій мережі;
- ΔF – смуга частот БС, МГц;
- P_b – Прийнятна ймовірність блокування;
- p_t – відсоток часу, протягом якого відношення сигнал/шум на вході приймача МС може бути менше захисного відношення;
- h_{BS} – висота БС антени, м;
- G_{BS} – коефіцієнт підсилення антени (КПА) БС, дБ;
- P_{BS} – потужність передавача БС, дБ;
- k – загасання радіохвиль.

Наступні параметри необхідно обчислити в процесі проєктування мережі:

- N_k – кількість частотних каналів;
- n_s – кількість каналів у секторі;
- A – допустиме навантаження;
- N_{aBS} – кількість абонентів, що обслуговуються однією БС;
- N_{BS} – кількість БС в мережі;
- R – радіус стільника;
- P_e – ймовірність помилки;
- γ – коефіцієнт ефективності використання радіочастотного спектра.

Існує кілька підходів до розрахунку технічних параметрів проєктованої

мережі. У даній роботі ми будемо використовувати метод в якому використовуються такі співвідношення:

1. Величина допустимого телефонного навантаження розраховується наступним чином:

$$A = n_0 \left(1 - \sqrt{1 - \left(P_b \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right) \text{ для } P_b \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} ; \quad (3.1)$$

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left(P_b \sqrt{\frac{\pi n_0}{2}} \right)} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \text{ для } P_b > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} , \quad (3.2)$$

де n_0 – це кількість абонентів, які при заданій якості і надійності сигналу, може одночасно працювати в одному секторі кожного стільника.

2. Число частотних каналів потрібних для функціонування мережі зв'язку в заданій місцевості, визначається за допомогою виразу

$$N_k = \text{int} \left(\frac{\Delta F}{F_k} \right), \quad (3.3)$$

де F_k – діапазон частот для одного каналу, визначений стандартом радіозв'язку.

Розмірність кластера проектованої мережі визначається наступним співвідношенням:

$$p(C) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{\infty} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx \right) \cdot 100, \quad (3.4)$$

де

$$x_1 = \frac{10 \lg \left(\frac{1}{\beta_e} \right) - \rho_0}{\alpha_\rho},$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right) \exp \left(\frac{\gamma_e^2 (\sigma^2 - \alpha_e^2)}{2} \right),$$

$$\alpha_p^2 = \sigma^2 + \alpha_e^2,$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma_e^2} \ln \left(1 + \left(\exp(\gamma_e^2 \sigma^2) - 1 \right) \frac{\sum_{i=1}^l \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^l \beta_i \right)^2} \right)$$

Значення цього інтеграла, що представляє собою табличну Q-функцію, наведені в довідковій літературі.

Параметри l і β_i визначаються в залежності від типу BS антени (спрямовані або секторальні) наступним чином (M – кількість секторів, $q = D / R = \sqrt{3C}$):

- якщо $\varphi = 360^\circ$ і $M = 1$, $l = 6$ і $\beta_1 = \beta_2 = (q - 1)^{-4}$, $\beta_3 = \beta_4 = q^{-4}$, $\beta_5 = \beta_6 = (q + 1)^{-4}$;
- якщо $\varphi = 120^\circ$ і $M = 3$, $l = 2$ і $\beta_1 = (q + 0,7)^{-4}$, $\beta_2 = q^{-4}$;
- якщо $\varphi = 60^\circ$ та $M = 6$, $l = 1$ і $\beta_1 = (q + 1)^{-4}$.

Таким чином, після знаходження значень x_l , що визначається відсоток часу відмови з'єднання $p(C)$. Якщо $p(C) \leq p_t$, то вибране значення C підходить для вказаних умов проектування, якщо ця умова не виконується ($p(C) > p_t$), то розрахунки продовжують з більшим значенням C .

Для мереж n_0 обчислюється за допомогою наступного виразу:

$$n_0 = \left(\frac{1 - \lambda}{\alpha \rho_0} \right) \frac{(B_r / B_i)}{2 + \exp(m_0 + K_T \sigma_0)}, \quad (3.5)$$

де $\lambda = 0,2$ – це потужність, витрачена передавачем БС на пілотний сигнал;

$\alpha = 3/8$ – частка пауз у загальній тривалості бесіди; B_i – швидкість передачі інформації, біт/с; σ_0 – рівень флуктуацій; ρ_0 – захисне відношення МС приймача; K_T – допустимий відсоток часу, коли зменшується сигнал/шум відносно ρ_0 .

Параметр K_T розраховується за такою формулою:

$$P_T = 100 \int_{K_T}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}} \quad (3.6)$$

При $P_T = 10\%$, значення коефіцієнта K_T становитиме 1,29.

Коефіцієнт m_0 задається наступним виразом:

$$m_0 = \ln \left(\frac{\xi_1 \exp\left(\frac{\gamma_e^2 \sigma^2}{2}\right)}{\sqrt{(1 - \xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma_e^2 \sigma^2)}} \right) - \frac{3\gamma_e}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sigma, \quad (3.7)$$

де σ – дисперсія колювання сигналу в точці прийому ($\sigma = 4 - 10$ дБ для системи стільникового зв'язку);

$$\gamma_e = 0,1 \ln(10) = 0,23;$$

$$\xi = 3(M+1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2};$$

$\xi = (3(M+1)^2 \cdot 2^{-2(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k}) \cdot (3(M+1) \cdot 2^{-(k+1)} + 6 \cdot 7^{-k/2})$; $k = 3 - 4$ – коефіцієнт загасання радіохвиль.

Для мереж стільникових коефіцієнт σ_0 для визначення дисперсії гаусової випадкової величини z_0 задається наступним чином:

$$\sigma_0 = \sqrt{\ln[(1 - \xi_2) + \xi_2 \exp(\gamma_e^2 \sigma^2)] + 0,03 \sigma^2}. \quad (3.8)$$

3. Кількість абонентів, що обслуговуються однією БС, визначається з наступного співвідношення:

$$N_{aBS} = M \operatorname{int} \left(\frac{A}{\beta} \right) \quad (3.9)$$

Як видно вона залежить від числа секторів телефонного навантаження та активності підписників.

4. Кількість БС, необхідне для працездатності проектованої мережі, визначається співвідношенням

$$N_{BS} = \text{int} \left(\frac{N_a}{N_{aBS}} \right), \quad (3.10)$$

де N_a – запланована кількість абонентів, яких мережа повинна обслужити.

5. Припустимо, що навантаження по всій площі зони розподілена рівномірно, тоді радіус стільника можна визначити наступним чином:

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{BS}}} \quad (3.11)$$

6. Імовірність виникнення помилок у сеансі зв'язку є одним з найважливіших показників ефективності телекомунікаційної мережі. Вона визначається при $C \geq 3$ за такою формулою для найгіршого випадку – розташування МК на краю зони обслуговування:

$$P_e \approx \frac{1}{(\sqrt{3}C - 1)^{2k}} \quad (3.12)$$

7. Ефективність радіочастотного спектра γ для мереж вона залежить від кількості активних абонентів у частотному діапазоні:

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k} \quad (3.13)$$

Розрахувавши основні параметри мережі, можна переходити до розробки попереднього плану стільникової мобільної мережі.

Як видно з аналізу, ефективність функціонування системи зв'язку оцінюється сукупністю часткових показників надійності N , пропускної здатності

V і вартості C (під вартістю будемо розуміти економічну ефективність - коефіцієнт ефективності капітальних витрат). Таким чином, узагальнений показник ефективності системи зв'язку можна записати у вигляді наступної функції:

$$\Phi = f(C, N, V),$$

де аргументами функції f є умови функціонування проектованої системи зв'язку і вимоги, що пред'являються до неї, виражені у вигляді системи обмежень на ті чи інші показники. Тип функції f визначається призначенням системи.

Математично задачу підвищення ефективності системи зв'язку можна записати у вигляді наступної цільової функції:

$$\max[f(C, N, V)],$$

де максимум узагальненого показника знаходиться серед можливих реалізацій системи зв'язку з урахуванням накладеної системи обмежень на ті чи інші показники.

3.2. Особливості планування мережі LTE

Стандарт LTE (Long Term Evolution) став новою сходинкою в ланцюжку стандартів стільникового зв'язку GSM-UMTS-LTE і орієнтований на передачу тільки пакетного трафіку на основі високошвидкісних технологій передачі пакетних даних. Стандарт LTE базується на технологіях мультиплексування за допомогою ортогональних несучих OFDM, використанні багатоантенних MIMO систем і побудові еволюційної системної архітектури мережі (System Architecture Evolution) [6].

У порівнянні з раніше розробленими 3G-системами, повітряний інтерфейс LTE забезпечує поліпшені технічні показники. Так, у новому стандарті діапазон частот каналу зв'язку може змінюватися від 1,4 до 20 МГц, що дозволяє

задовольнити потреби різних операторів зв'язку. При цьому LTE-обладнання підтримує понад 200 активних підключень в зонах обслуговування базової станції мережі на частотному діапазоні 5 МГц каналу зв'язку.

У мережах LTE використовуються антенні системи типу МІМО, з використанням однієї, двох і чотирьох передавальних і приймальних антен в різних комбінаціях. Стандарт також допускає можливість створення сегмента LTE в існуючих діапазонах мереж W-CDMA і GSM [87].

При плануванні радіомережі LTE бажано дотримуватися загальноприйнятої часової і логічної послідовності дій:

1. Отримання вихідних даних.
2. Калібрування математичної моделі поширення радіохвиль на основі вимірювань напруженості поля в найбільш характерних точках зони обслуговування мережі.
3. Побудова мережі початкового наближення.
4. Прив'язка до місцевості місць розгортання базових станцій, визначених планом будівництва (мережі початкового заходу на посадку).
5. Ітеративна оптимізація мережі з широким використанням програмних засобів, що підтримують синтез мережі та аналіз продуктивності.

У вигляді блок-схеми даний алгоритм представлений на рис. 14

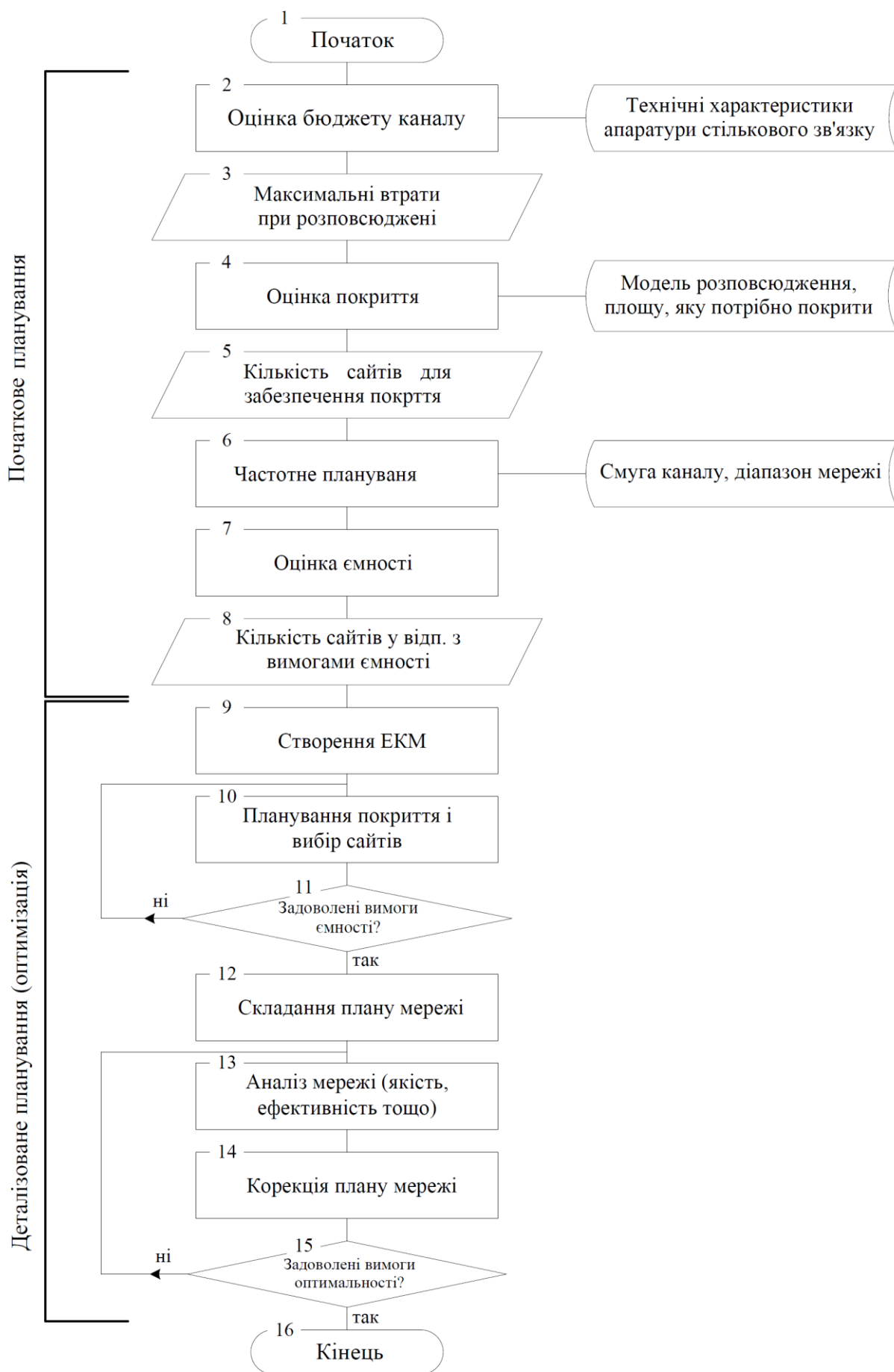


Рисунок 14 – Планування мережі LTE

Основна складність на початковому етапі планування мереж LTE полягає у формулюванні вимог до мережі початкового наближення та пошуку балансу між ємнісними, швидкісними та просторовими показниками мережі. Завдяки можливості використання різних MCS (модуляційно-кодувальних схем з можливістю зміни надлишкової швидкості кодування) мережа LTE, заснована на вимірюванні відношення сигнал/шум на приймальному кінці, може гнучко адаптуватися до мінливих умов поширення сигналу. Необхідне співвідношення s/n на прийомі буде варіюватися в залежності від типу використовуваної модуляції сигналу і швидкості перекодування, так як кожна MCS має свої вимоги до якості каналу.

У мережі LTE весь діапазон частот може бути повністю використаний кожним сотим, незалежно від розташування абонентів у стільнику. При цьому розподіл блоків ресурсів здійснюється за допомогою спеціального планувальника [6].

Відмінності в процесі планування для трьох поколінь мереж зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Відмінності в плануванні мережі

Стандарт	Етапи планування
Послуги GSM	1. Вибір типу частотного кластера 2. Визначення просторових параметрів мережі 3. Визначення параметрів базової станції (виходячи з бюджету втрат) 4. Складання частотного плану
WCDMA	1. Визначення кількості каналів трафіку в стільнику в залежності від внутрішньосистемних завад (навантаження на мережу) 2. Визначення просторових параметрів мережі 3. Розрахунок параметрів базової станції (виходячи з того, що сигнал є груповим; розрахунок на основі пілотного сигналу) 4. Розподіл зсувів коду по секторах
Технологія LTE	1. Визначення просторових параметрів мережі 2. Планування частоти 3. Оцінка пропускної здатності для заданого профілю трафіку 4. Уточнення параметрів базової станції та зони обслуговування залежно від трафіку

Самі стадії і методи планування аналогічним чином відрізняються в різних поколіннях стільникового зв'язку (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Проектування мереж GSM, WCDMA і LTE

Ім'я	Послуги GSM	WCDMA	Технологія LTE
Планування частотних ресурсів	Розподіл частотних каналів між базовими станціями	Не вимагається	Розподіл фрагментів системних смуг серед користувачів Базові станції
Наявність регулярної методики Планування	Існує	Доступно для високошвидкісних і низькошвидкісних Передачі	Ні
Перемикання	Канали, пакети	Канали, пакети	Пакети (все через IP)
Передачі Інформація	Вузькосмуговий знак	Широкосмуговий знак	OFDM
Профіль трафіку	Мовлення, Мобільний Інтернет, Фоновий трафік	Мовлення, Потоківідео, Мобільний Інтернет, фоновий трафік	VoIP, Потоківідео, Мобільний Інтернет, фоновий трафік
Службова дисципліна	Speech-SMO з відмовами, Мобільний Інтернет-SMO з чергами та пріоритетами	Speech-SMO з відмовами, Мобільний Інтернет-SMO з чергами та пріоритетами, Потоківідео-SMO без зволікань	VoIP - SMO з відмови, Мобільний Інтернет - SMO з чергами та пріоритетами, Потоківідео SMO без зволікань

3.3. Моделі впливу поширення радіохвиль на ефективність системи

Моделювання втрат при поширенні сигналу

Основними факторами, що впливають на вибір параметрів мобільної мережі, таких як тип модуляції, потужність передавача, структура приймача і якість покриття, є модель поширення, спосіб відображення реальних умов поширення в обраній моделі, а також припущення про структуру радіополя.

У різних мережах умови поширення радіохвиль можуть варіюватися від найпростішої ситуації поширення однопроменевого сигналу між приймачем і передавачем в умовах прямої видимості до багатопроменевого поширення з множинними відбиттями від штучних споруд і складок місцевості в умовах доплерівської зміни частоти при русі об'єкта або перешкод. Оскільки радіоканал є статичною системою, на відміну від дротових ліній зв'язку, його властивості можна визначити лише з певною ймовірністю. І значною мірою результати розрахунку параметрів радіоканалу залежать від обраної моделі. Моделі, засновані на одних і тих же принципах, розрізняються за способом відображення реальної ситуації. Рекомендації різних національних і міжнародних телекомунікаційних організацій значно різняться, і тому не існує єдиної загальноприйнятої моделі розрахунку поширення сигналу в міських умовах. У зв'язку з тим, що вимірювання параметрів моделі носить імовірнісний характер і вимагає великої кількості вимірювань і випробувань в різних умовах (погодні умови, пори року, характер будівель, географічні параметри місцевості і т. Д.), Підбір адекватної моделі поширення радіохвиль є складним завданням. Також для порівняння і оцінки якості радіомережі слід враховувати, що апаратні компоненти мережі, побудовані на базі обраної моделі, можуть істотно відрізнятися як функціонально, так і за реалізованими параметрами. З цього випливає, що відмінності в якості функціонування системи мобільного зв'язку завжди можна віднести як до обраної моделі радіоканалу, так і до реалізованого обладнання.

В ході аналізу поширення радіохвиль визначається дальність радіозв'язку і реальні характеристики прийнятого сигналу. Класичний підхід до розрахунку розподілу електромагнітного поля в присутності відбиваючих і поглинаючих об'єктів полягає в розрахунку напруженості поля в однорідному ізотропному просторі на основі законів відбиття, дифракції і розсіювання. Однак специфічні умови міста, такі як велика кількість нерухомих перешкод складної форми, рух і нестабільність розташування приймачів, передавачів і перешкод, виключають можливість безпосереднього застосування такого прийому і не дають

можливості точного розрахунку розподілу радіополя. Точний розрахунок розподілу поля використовується тільки у виняткових, простих випадках, наприклад, таких, як розрахунок радіотіньової зони за великою перешкодою для сигналу з точним розташуванням передавача базової станції, так як в інших випадках обсяг обчислень, що виникають при розрахунку, перевищує всі існуючі технічні можливості. Реальний розрахунок розподілу електромагнітного поля проводиться на основі двох моделей:

- «великої відстані»;
- «малої відстані».

Модель «великої відстані» враховує макроефекти, що впливають на електромагнітне поле, що виникають через перешкоди великого розміру в порівнянні з довжиною хвилі. Згідно з цією моделлю, рівняння для електромагнітного поля в міських умовах відрізняються від рівнянь вільного простору лише параметрами поширення, а також певною ймовірністю відхилення дійсних значень розподілу радіополя від розрахункових. Тобто наявність перешкод надає, в середньому, невеликий вплив на структуру електромагнітного поля, яке залишається таким же, як і у вільному просторі – стаціонарному, плавному і монотонному. Стаціонарність має на увазі незмінність структури поля в часі, гладкість означає відповідність невеликих змін відстані невеликим змінам напруженості поля, монотонність означає безперервне зменшення величини поля зі збільшенням відстані від приймача до передавача.

Використання експериментально вимірених параметрів моделі забезпечує найвищу точність розрахунків для конкретного регіону.

Для наближених аналітичних розрахунків імовірнісного діапазону радіозв'язку використовуються методи, засновані на рекомендаціях EURO COST (Європейська асоціація наукових і технічних досліджень) і рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) [5, 1].

Ці методи ґрунтуються на результатах статистичної обробки великої кількості експериментальних даних, що описують параметри моделі для різних

типових ситуацій (земля або вода, що підстиляє поверхню, передмістя, великі міста тощо).

Більшість загальноприйнятих методів розрахунку дальності радіозв'язку розроблено для транкінгових мереж зв'язку. Такі мережі характеризуються відносно великою відстанню зв'язку (десятки кілометрів) і великою висотою передавальної антени (встановлюються на висотних будівлях і вишках). У таких умовах поширення можна розглядати «середні» значення потужності.

При розрахунку дальності зв'язку в невеликих осередках застосування цих методів можливо тільки з застереженнями, так як на відстані в сотні метрів і при розрахунку загасань всередині будівель говорити про це практично неможливо «середня» однорідність поля.

Причому будь-який розрахунок дальності радіозв'язку за допомогою будь-яких методів може бути тільки оцінений, а його достовірність визначається тим, наскільки «середні» умови поширення збігаються з реальними, а також залежить від правильності вибору введених в модель поправочних коефіцієнтів в залежності від умов конкретного регіону.

Класифікація моделей поширення радіосигналу представлена на рис. 15.

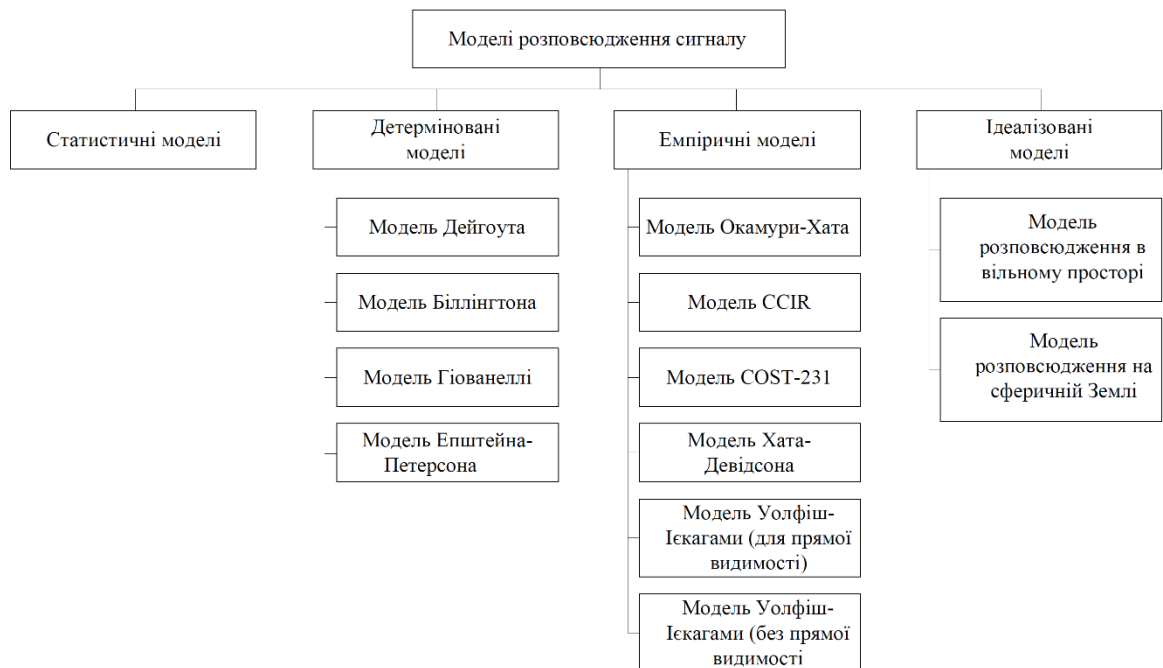


Рисунок 15 – Класифікація типових моделей розподілу

Для аналітичних розрахунків дальності радіозв'язку в системах з аналоговими сигналами Міжнародна консультативна комісія з радіозв'язку (CCIC) розробила «Методику визначення очікуваної дальності УКХ радіозв'язку з рухомими об'єктами», складену на основі документів CCIR «Рекомендація 370» та «Звіт 239». Цей метод ґрунтується на таких положеннях [33, 122]:

- Розмір зони обслуговування системи зв'язку розраховується виходячи з мінімального значення відношення сигнал/шум на виході приймача, при якому досягається необхідна розбірливість мови. Для систем з цифровими сигналами прийнято вважати, що поняття «розбірливість мови» замінюється на «надійність прийому». У «Методиці» та «Рекомендаціях» ці поняття не визначені;

- розрахунки, проведені за «Методикою» та «Рекомендаціями», носять імовірнісний характер. Це пов'язано з тим, що за допомогою точних математичних розрахунків можна отримати лише окремі параметри, що характеризують дальність радіозв'язку. Велика кількість поправочних коефіцієнтів, що використовуються в розрахунках, вибирається на основі середньострокових багаторічних спостережень. Повнота цих даних і можливість їх застосування в кожному конкретному випадку залишається невирішеною проблемою;

- в основу "Методики" покладені криві поширення радіохвиль. Ці криві відображають залежність середньої напруженості електромагнітного поля E (децибел щодо 1 мкВ/м при 1 кВт ефективної випромінюваної потужності і висоти передавальної антени 10 м) в точці розташування приймача на різних відстанях d до передавача і значень висоти антени приймача h . Графіки відповідають 50% ймовірності встановлення радіозв'язку на 50% території і нанесені для різних частот і типів підстилаючих поверхонь.

Ґрунтуючись на ряді вимірювань, зроблених в США, У. К. Й. Лі запропонував досить просту модель поширення сигналу за допомогою несучої Частота $f_c = 900$ МГц. Середнє значення потужності, виміряної на відстані d від передавальної станції, за моделлю Лі, можна описати за допомогою наступного

виразу:

$$P(d) = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-\gamma} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-n} F_0, \quad (3.14)$$

або логарифмічні

$$\begin{aligned} (P(d))_{dB} &= (P_0)_{dB} - \gamma \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) - n \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) (F_0)_{dB} \\ F_0 &= \prod_{i=1}^5 F_i, \end{aligned} \quad (3.15)$$

де P_0 – опорна медіанна потужність, виміряна на відстані $d_0 = 1$ км;

F_0 – поправочний коефіцієнт, визначається за допомогою компонентних множників. Коефіцієнти F_i розраховуються таким чином:

$$\begin{aligned} F_1 &= \left(\frac{h_{BS,eff}}{30,48} \right)^2; \\ F_2 &= \left(\frac{h_{MS}}{3} \right)^v; \\ F_3 &= \frac{P_T}{10}; \\ F_4 &= \frac{G_T}{4}; \\ F_5 &= G_R, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де $h_{BS,eff}$ – ефективна висота антени базової станції, м; v – показник степені ($v=1$

на висоті антени пересувної станції менше 3 м, на висоті більше 10 м $v=2$) P_T – потужність сигналу передавача базової станції, Вт; G_T, G_R – коефіцієнт підсилення основної та мобільної антен відповідно базової станція відносно напівхвильового вібратора.

Параметри P_0 і γ були отримані експериментально в результаті вимірювань в різних типах середовищ і представлені в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Значення P_0 та γ для різних типів середовища

Тип середовища	P_0	γ , дБ на декаду
Вільний простір	-41	20,0
Сільська місцевість, розріджена забудова	-40	43,5
Передмістя, маленьке містечко	-54	38,4
Філадельфія	-62,5	36,8
Нью-Йорк	-55	43,1
Токіо	-78	30,5

Система, в якій проводилися вимірювання, що послужили основою для емпіричних формул моделі Лі, має наступні параметри:

- несуча частота $F_c = 900$ МГц;
- висота антени базової станції $h_{BS,eff} = 30$ м;
- рівень сигналу, що передається $P_T = 10$ Вт;
- коефіцієнт підсилення антени базової станції відносно напівхвильового вібратор $G_T = 6$ дБ;
- висота антени мобільної станції $h_{MS} = 3$ м;
- коефіцієнт підсилення антени мобільної станції $G_R = 0$ дБ.

Ці параметри відображаються у формулах у вигляді коефіцієнтів $F_1 \dots F_5$.

Іншою поширеною моделлю для прогнозування сигналів у міських умовах є модель Окумури. Він також базується на багатьох вимірах. Ці вимірювання були зроблені в Токіо в діапазоні частот від 150 до 1920 МГц. У підсумку, щоб описати залежність медіанних втрат $(L_{50})_{dB}$ від відстані D до передавальної антени базової станції була запропонована наступна формула:

$$(L_{50})_{dB} = L_S + A(f, d) + G(h_{BS,eff}) + G(h_{MS});$$

$$L_S = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3.17)$$

де L_c – втрати при поширенні у вільному просторі; $A(f,d)$ – медіанне значення втрат міському середовищі з квазі-гладкою земною поверхнею по відношенню до загасання у вільному просторі в разі Якщо ефективна висота антени базової станції $h_{BS,eff} = 200$ м, а висота антени мобільної станції $h_{MS} = 3$ м; $G(h_{BS,eff})$ – коригуючий коефіцієнт (в дБ), що враховує різницю ефективної висоти антени базової станції від 200 м; $G(h_{MS})$ – поправочний коефіцієнт (в дБ), в залежності від висоти антени мобільної станції, якщо вона відрізняється від 3 м.

Втрати при поширенні у вільному просторі, L_S обчислюються в логарифмічному масштабі.

Таким чином, за допомогою формули (3.17) і емпіричних графіків, можна оцінити загасання сигналу в міських умовах на частотах від 150 до 2000 МГц, якщо відстань між мобільною і базовою станціями становить від 1 до 100 км, а ефективна висота антени базової станції лежить в діапазоні від 30 до 1000 м.

Модель Окамура досить проста. Характеристики міських територій в Європі або США дещо відрізняються від характеристик японських міських територій, але, незважаючи на це, модель Окамура популярна і вважається однією з кращих для розвитку наземних систем мобільного зв'язку. Головним недоліком цієї моделі є повільна реакція на зміну типу місцевості. Модель Окамура найкраще підходить для міських і приміських районів і не така ефективна для проектування систем в сільській місцевості.

Коли емпіричні формули були адаптовані до графіків, складених Окамура, з'явилася модель Хата. Ці формули добре апроксимують графіки в певних діапазонах несучих частот на квазігладкій земній поверхні. Для оцінки загасання в міських районах в діапазоні частот від 150 до 1500 МГц при ефективній висоті антени базової станції від 30 до 200 м, були запропоновані наступні емпіричні формули

$$\begin{aligned} (L_{50})_{dB} \Big|_{micmo} &= 69,55 + 26,16 \cdot \lg f - 13,83 \cdot \lg(h_{BS,eff}) - \\ &- a(h_{MS}) + \left(44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{BS,eff}) \right) \cdot \lg d; \\ a(h_{MS}) &= (1,1 \cdot \lg f - 0,7) h_{MS} - 1,56 \cdot \lg f + 0,8, \end{aligned} \quad (3.18)$$

де $a(h_{MS})$ – це поправочний коефіцієнт, який залежить від висоти антени мобільної станції і варіюється в діапазоні висот від 1 до 10 м.

Для великого міста вона задається виразами (в дБ):

$$a(h_{MS}) = 8,29(\lg 1,54h_{MS})^2 - 1,1 \text{ для } f < 400 \text{ МГц,}$$

$$a(h_{MS}) = 3,2(\lg 11,75h_{MS})^2 - 4,97 \text{ для } f > 400 \text{ МГц.}$$

Для приміської місцевості втрати при розповсюдженні сигналу описується наступною формулою:

$$(L_{50})_{dB} = (L_{50})_{dB}|_{місто} - 2\left(\lg\left(\frac{f}{28}\right)\right)^2 - 5,4 \quad (3.19)$$

На відкритій місцевості втрати описуються виразом

$$(L_{50})_{dB} = (L_{50})_{dB}|_{місто} - 4,78(\lg f)^2 + 18,33 \cdot \lg f - 40,94 \quad (3.20)$$

Таким чином, описані вище моделі дозволяють оцінити залежність втрат при поширенні сигналу від несучої частоти, висоти антен базової і пересувної станцій, а також типу місцевості. Ці моделі точно відображають поширення сигналу на відстані понад 1 км, і найкраще підходять для частот до 1,5 ГГц. Однак існують персональні системи зв'язку, які працюють в діапазоні від 1,8 до 2,0 ГГц, такі як DCS 1800 і PCS 1900, які є версіями системи GSM і поширені в Європі та Сполучених Штатах відповідно. Для створення моделей поширення сигналу в системах PCS, було проведено безліч вимірювань і проведено численні експерименти. Діапазон 1,8 ГГц відрізняється від традиційного діапазону стільникового зв'язку 900 МГц більшим загасанням, за рахунок чого основною відмінністю систем PCS від звичайних систем ССР є зменшений розмір комірок. Дослідження нових моделей розподілу проводилися в рамках проекту

Європейського Союзу COST-231. В результаті проектів COST було розроблено і представлено в довідковій літературі як мінімум дві моделі розповсюдження:

- модель COST231-Хата;
- модель COST231-Walvis-Ikegami.

Модель врахування впливу рельєфу на зону покриття одиночного джерела та системи загалом.

У процесі пошуку оптимального рішення проблеми територіального планування необхідно розрахувати площу покриття з усіх розташованих ресурсів. Таким чином, враховуючи використання еволюційних алгоритмів для пошуку рішення та ГІС-технологій для отримання інформації про місцевість, необхідно розробити лінійний алгоритм, що дозволяє розрахувати покриття з окремого ресурсу.

Основний метод пошуку передбачає, що еволюційний алгоритм циклічно розміщує ресурси на заданій території. Кожен розміщений ресурс має свій радіус зони покриття. Для оцінки ефективності покриття території кожним ресурсом використовується алгоритм, в якому використовується карта висот даної місцевості.

На рис. 16_ показана схема розрахунку різних параметрів.

У процесі виконання алгоритму використовуються такі значення:

1. j – місце розташування ресурсу
2. $j+1$ – осередок біля місця розташування станції
3. $h(j+1)$ – висота в комірці $j+1$

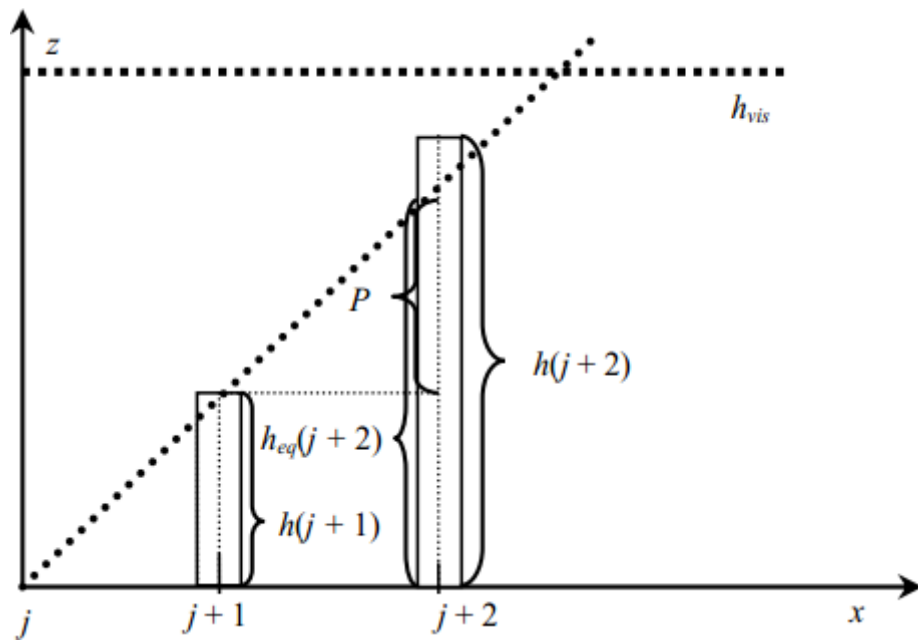


Рисунок 16 – Схема розрахунку параметрів прямої видимості

4. $h_{eq}(j+2)$ – еквівалентна висота в комірці $j+2$
5. P – різниця між $h_{eq}(j+2)$ та $h(j+1)$
6. $h(j+2)$ – висота в комірці $j+2$
7. h_{vis} – рівень видимості
8. Починаючи з місця розташування ресурсу, еквівалентна висота обчислюється для всіх комірок за формулою, отриманою з відношення трикутників:

$$[(j+1)-j]:h(j+1)=[(j+2)-(j+1)]:P \quad (3.21)$$

Виразимо P :

$$P = \frac{h(j+1)[(j+2)-(j+1)]}{(j+1)-j} = h(j+1) \quad (3.22)$$

З формули (3.22) маємо:

$$h_{eq}(j+2) = h(j+1) + P = 2h(j+1) \quad (3.33)$$

Отримане значення використовується для перевірки видимості осередків.

Початкові умови цього алгоритму такі:

- висота рівня видимості вище максимальної висоти комірок
- викривлення землі не впливають на розрахунки
- для спрощення подальших розрахунків діаграма спрямованості характеризується колом з фіксованим радіусом, також можлива заміна її алгоритмом з іншою діаграмою антени, але це значно збільшить час розрахунку.

Розрахунок ефективної зони покриття ресурсу проводиться відповідно до обраного напрямку. На рис. [17](#) показана схема роботи алгоритму оцінки видимості комірок по кожному напрямку.

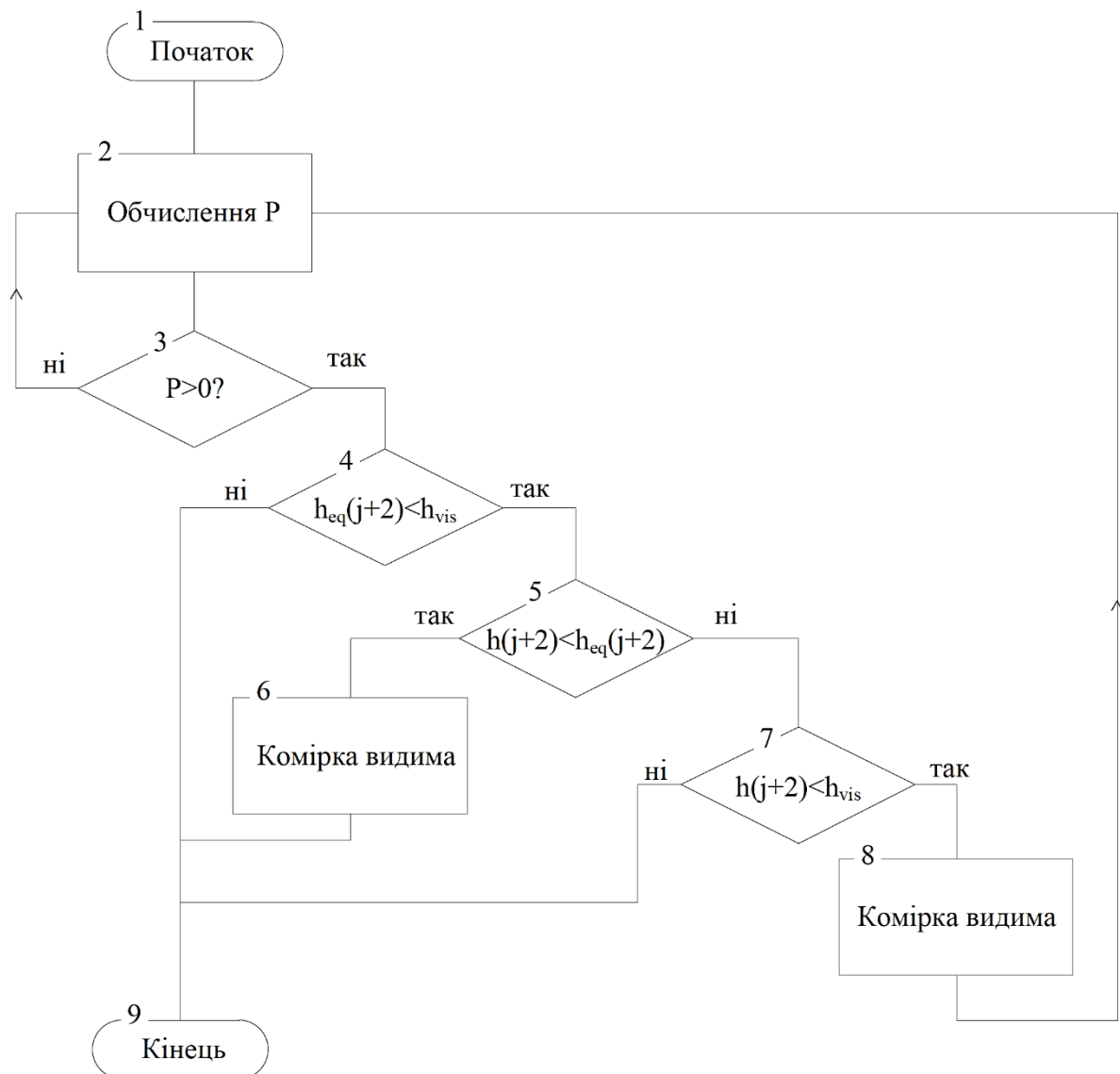


Рисунок 17 – Алгоритм оцінки видимості Комірок

Алгоритм дій

1. Обчислюється перше значення P між коміркою розташування ресурсу і наступною. Якщо P менше нуля, це означає, що наступна клітинка менш висока, ніж клітинка розташування ресурсу, а отже видима на висоті h_{vis} . Значення P обчислюються для всієї зони покриття. Якщо $P > 0$, то здійснюється перехід до наступного кроку.

2. Еквівалентна висота порівнюється з рівнем видимості, якщо розрахункове значення менше, то розрахунки для цього променя завершені, в іншому випадку здійснюється перехід на крок 3.

3. Порівнюється еквівалентна висота і висота комірки. Якщо перша комірка більше, то комірка видима і розрахунки для цього променя закінчуються. В іншому випадку висота комірки порівнюється з рівнем видимості і, якщо висота менша, значення P змінюється на поточне і комірка оголошується видимою. Алгоритм повертається до кроку 1.

Ці 3 кроки стосуються всієї зони покриття за вказівками, описаними нижче. Тому необхідно застосувати всі кроки в циклі до кожного променя, який виходить з місця розташування ресурсу під зазначеним кутом. Також необхідно перевірити комірки, розташовані між сусідніми променями.

На рис. 18 показана схема обробки сітки з фіксованим кроком комірок і радіусним кутом.

Для аналізу не розглянутих осередків використовується приблизний алгоритм, але можна визначити, видно комірку чи ні. Алгоритм заснований на запам'ятовуванні видимих комірок на променях, що переглядаються, після запам'ятовування положень двох сусідніх променів комірки між ними оголошуються видимими.

Для спрощення розрахунків початкові популяції використовують велику відстань між сусідніми променями, а потім зменшують це значення для отримання більш точних результатів.

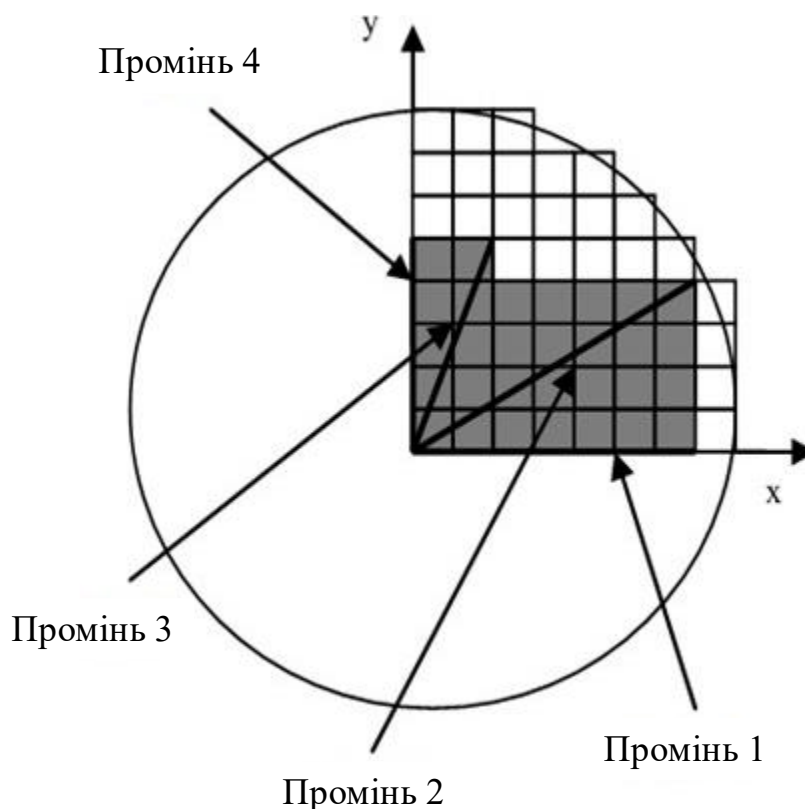


Рисунок 18 – Схема обробки комірок

3.4. Моделювання зони покриття

Зона радіопокриття базової станції залежить від ряду факторів. Серед них параметри приймача БС, рельєф місцевості, щільність забудови, характеристики випромінювання мобільних станцій тощо. Однак навіть найскладніші, комплексні методи не дають абсолютно точної фізичної моделі поширення радіохвиль. Таким чином, неможливість врахувати всі фактори впливу дозволяє говорити лише про оцінку зони радіопокриття сигналу БС.

Алгоритм побудови зон обслуговування БС можна представити наступним чином (рис. 19):

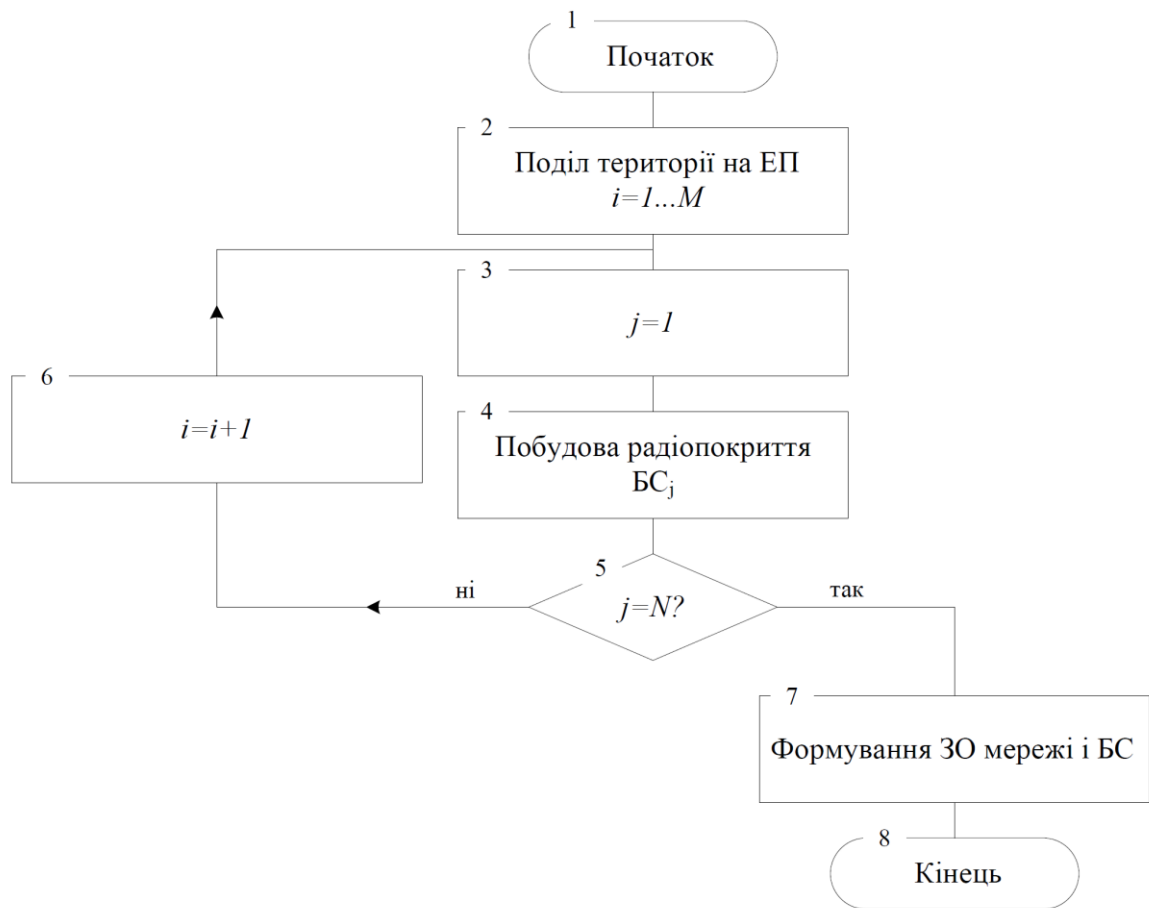


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритму побудови зон обслуговування

В результаті побудови радіопокриття кожної базової станції і відповідних абонентських (мобільних) станцій формується сукупність зон покриття, що складаються з елементарних ділянок, зображених у вигляді квадратів центрується в точці з координатами $(Ш_i, Д_i)$ і мають наступний набір атрибутів:

- серійний номер, ID^j ;
- рівень сигналу на вході МС приймача, що генерується передавачем БС, P_{BSi}^j , дБВт;
- рівень сигналу на вході приймача БС, що генерується передавачем МС P_{MSi}^j дБВт;
- загасання сигналу на трасі BS-MS, L_i^j , дБ;
- довжина маршруту, D^j , км;
- азимут напрямку BS – МС, az_{12}^j , град

- азимут напрямку МС – БС, az_{21l}^j , град;
- коефіцієнт підсилення антени БС, G_{BSi}^j , дБ;
- коефіцієнт підсилення антени МС, G_{MSi}^j , дБ;

Перераховані параметри розраховуються для кожного i -го фрагмента території і j -го БС наступним чином (рис. 20):

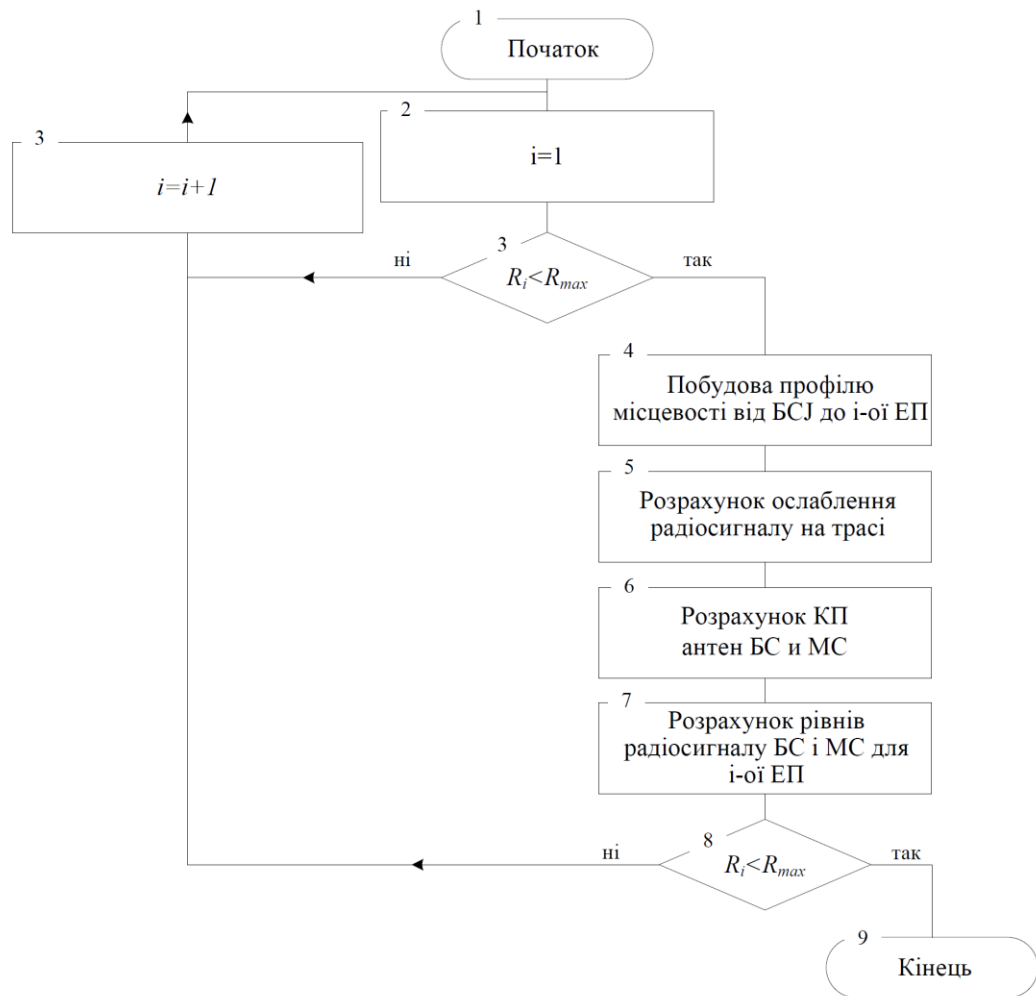


Рисунок 20 – Структурна схема алгоритму побудови радіопокриття БС

1. За допомогою значень координат обчислюється відстань r_i між БС і ЕП, якщо вона перевищує R_{max} , то здійснюється перехід до наступної ЕП.
2. Генерується профіль траси для визначення довжини траси і висоту антен над рівнем моря.
3. За алгоритмом описаним в рекомендації МСЕ С.1546 визначається загасання радіосигналу на трасі.

4. Розраховується коефіцієнт пісилення антени.

Таким чином, зона обслуговування кожної БС формується за результатами аналізу всієї сукупності елементів множини зон покриття, у вигляді сукупності зон обслуговування. Зона обслуговування мережі складається з зон обслуговування всіх базових станцій, тобто це сукупність всіх множин.

3.5. Вибір оптимального варіанту мережі стільникового зв'язку

В результаті багатокритеріального еволюційного алгоритму був отриманий набір оптимальних рішень по Парето. Щоб вирішити проблему проектування радіомережі, необхідно вибрати єдиний варіант мережі. Для цього необхідно залучити додаткову інформацію від особи, яка приймає рішення. Одним з методів вибору рішення серед альтернатив є метод аналізу ієрархій, запропонований Т. Сааті.

Таким чином, схему знаходження оптимального рішення можна представити наступним чином (рис. 21):

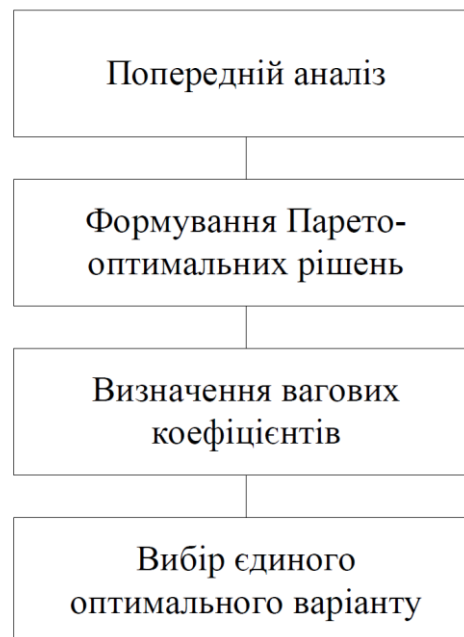


Рисунок 21 – Схема пошуку рішення

На першому етапі визначаються критерії, що беруть участь в оптимізації, і умов оптимізації (територія і вихідні параметри). На другому етапі за допомогою еволюційного алгоритму формується набір парето-оптимальних варіантів побудови мережі. На третьому етапі особа, яка приймає рішення, визначає важливість параметрів мережі в залежності від кінцевої мети оптимізації (наприклад, забезпечення максимальної площі покриття, пропускної спроможності або мінімізація витрат). З отриманих критеріїв формується ієрархічна структура, придатна для використання МАІ. На підставі коефіцієнтів, отриманих за допомогою МАІ, вибирається оптимальний план.

Метод аналізу ієрархії - це систематична процедура аналізу і представлення проблеми у вигляді ієрархії.

В основі МАІ лежать такі три принципи: розкладання, порівняння альтернатив і синтез пріоритетів. Аналіз починається з перетворення складної, багатокритеріальної задачі в ієрархію, кожен рівень якої складається з декількох простих елементів, які, в свою чергу, також поділяються на піделементи. На другому етапі для кожного рівня ієрархії розраховуються пріоритети елементів за допомогою методу попарного порівняння. На третьому етапі МАІ синтезує пріоритети елементів в загальні пріоритети альтернативних варіантів вирішення проблеми. МАІ відрізняється від інших загальноприйнятих методів підтримки прийняття рішень тим, що не вимагає від осіб, які приймають рішення, вказівки точних числових еквівалентів пріоритетів по кожному елементу, а дозволяє їм робити це в вербальному режимі за допомогою таблиці пріоритетів.

Згідно з принципами МАІ, на першому етапі відбувається підбір критеріїв, від яких залежить вибір тієї чи іншої альтернативи. Далі обрані критерії структуруються у вигляді ієрархії, щоб показати їх взаємодію один з одним і їх вплив один на одного.

Уявлення замовника про вимоги до проектованої мережі визначають основні напрямки оптимізації, що включаються в аналіз: надійність мережі, її потужність і вартість. Для забезпечення достатнього рівня деталізації критерії надійності та пропускної здатності поділяються на підкритерії. Надійність

можна розділити на наступні аспекти: кількість відмов, допустима ймовірність блокування дзвінка, допустиме телефонне навантаження, ефективність використання радіочастотного спектра. На пропуску здатність мережі впливають такі параметри: кількість абонентів, площа зони обслуговування, кількість виділених частотних каналів, активність абонентів за годину найбільшого навантаження. Вартість, в загальному, залежить від кількості БС. Ієрархія для МАІ представлена на рис.22.

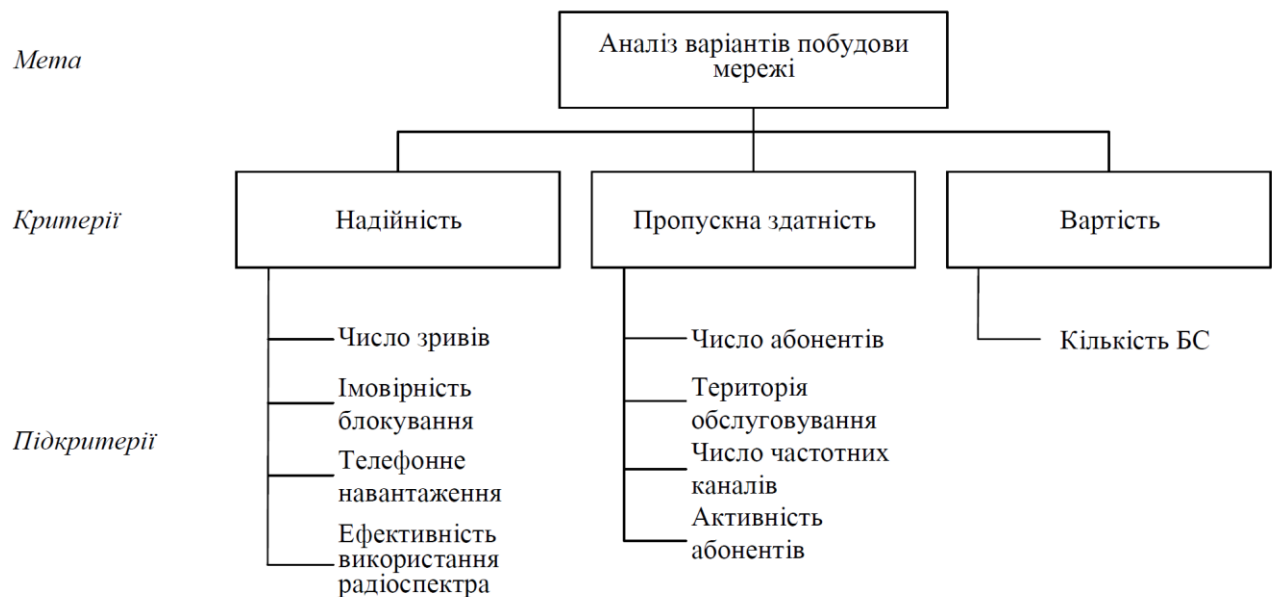


Рисунок 22 – Ієрархія МАІ для аналізу варіантів побудови мережі

Другим кроком МАІ є визначення пріоритетів для кожного елемента ієрархії. Пріоритети встановлюються шляхом попарного порівняння кожного набору елементів з урахуванням елементів, що знаходяться вище в ієрархії. Для розстановки пріоритетів Т. Сааті розробив спеціальну шкалу

Таблиця 10 – Шкала відносної важливості

Ступінь важливості	Визначення	Пояснення
1	Однакова значимість	Дві дії в рівній мірі сприяють досягнення мети
3	Певне переважання значущості однієї дії над іншою (слабка значимість)	Є міркування на користь переваги одного з об'єктів, але ці міркування недостатньо переконливі
5	Значна або сильна значимість	Є достовірні дані та логічні міркування, які можна показати перевагу одного з об'єктів
7	Очевидна значимість	Вагомі докази на користь переваги одного об'єкта над іншим
9	Абсолютна значимість	Докази на користь переваги одного об'єкту над іншим дуже переконливі
2, 4, 6, 8	Проміжні значення між двома судженнями	Ситуація, коли потрібне компромісне рішення
Обернені значення приведених чисел	Якщо елементу і при порівнянні з елементом j приписується одне з наведених вище чисел, то елементу j при порівнянні з і присвоюється протилежне значення.	

У груповій оцінці пріоритетів існує кілька варіантів врахування думок і поглядів кожного експерта. Існує чотири способи встановлення групових пріоритетів, коли є узгоджені цілі:

- угода;
- голосування або компроміс;
- середнє геометричне індивідуальних оцінок;
- ізольованих моделей або експертів.

Кращим методом в таких випадках є досягнення згоди між усіма експертами, але якщо цього не вдається досягти, то зазвичай використовується середнє значення балів. Приклад отриманих пріоритетів критеріїв представлений на рисунку 23.

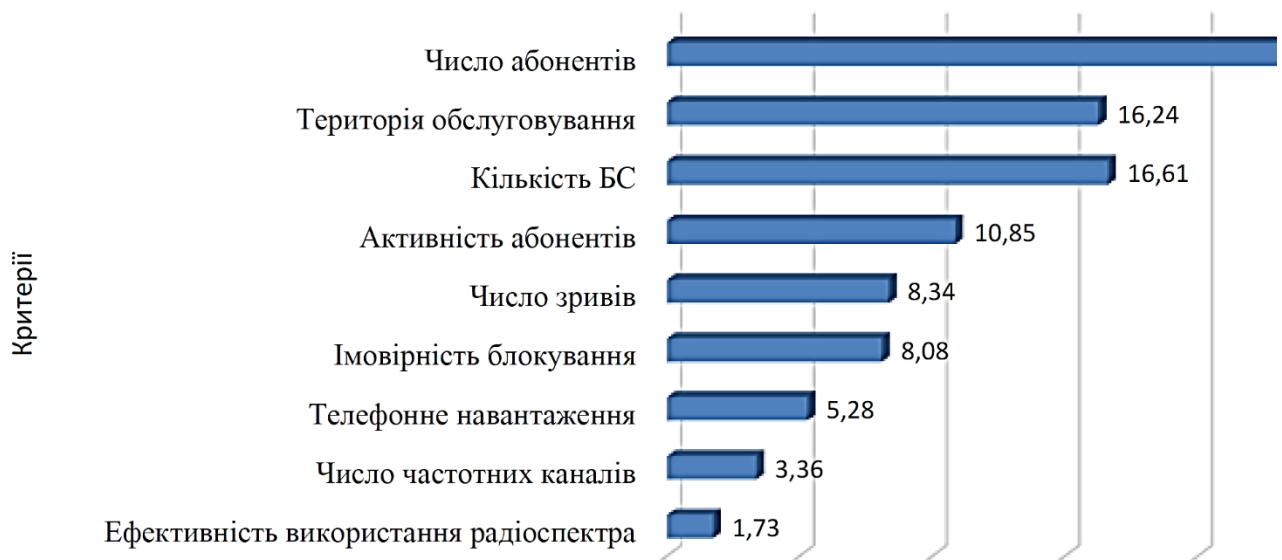


Рисунок 23 – Пріоритети критеріїв

У класичному підході до зважування та розстановки пріоритетів оцінки є цілими числами від 1 для «незадовільно» та 5 для «видатний». Таким чином, при застосуванні цієї шкали оцінювання може виникнути невірне припущення, що «відмінно» має бути в 5 разів краще, ніж «незадовільно». У МАІ ця проблема вирішується шляхом присвоєння значення важливості або корисності кожному критерію за допомогою попарного порівняння.

Аналіз альтернатив проводиться шляхом визначення оцінки і відповідного значення корисності для кожної можливої радіомережі з урахуванням значень всіх її критеріїв.

Наступним етапом стане остаточний вибір проекту радіомережі з використанням методів цілочисельного програмування - максимального врахування загальних переваг замовника. Таким чином, вибираючи оптимальне рішення відбувається з використанням пріоритетів замовника, отриманих в

результаті використання МАІ замість звичних методів - мінімізації, наприклад, загальної вартості або максимізації пропускної здатності. Максимізація преференцій має на увазі отримання найбільш підходящого проекту для кожного замовника і його вимог. Отриманий показник якості системи можна представити у вигляді скалярної цільової функції:

$$F(k_1, k_2, \dots, k_m) = \sum_{j=1}^m c_j f_j(k_j), \quad (3.34)$$

де c_j – коефіцієнти шкалювання, отримані в результаті МАІ, $f_j(k_j)$ – скалярні функції корисності, що відображають корисність отриманого варіанту мережі за показником k_j .

3.6. Висновки

У третьому розділі було проведено математичне моделювання систем стільникового зв'язку. Визначено параметри, що використовуються при проектуванні, складено методику обліку втрат при поширенні сигналу з використанням моделей ITU.

Розроблено методику побудови зон обслуговування та радіопокриття БС відповідно до рекомендацій МСЕ, а також модель визначення зони «прямої видимості».

Також була запропонована методика отримання оптимального проектного рішення, заснована на використанні методів багатокритеріальної оптимізації, еволюційного моделювання і методу аналізу ієрархій, який полягає в наступному: в результаті роботи багатокритеріального еволюційного алгоритму формується набір оптимальних рішень по Парето, для вирішення завдання проектування радіомережі необхідно вибрати єдиний варіант мережі. Методом вибору рішення серед альтернатив став метод аналізу ієрархій, запропонований Т. Сааті. Був синтезований гібридний метод знаходження оптимального рішення,

що характеризується поєднанням методів багатокритеріальної оптимізації, еволюційного моделювання та ієрархічного аналізу, характеризується ефективністю оптимізації та застосовний до різних технічних задач, що включають 4 етапи:

1. Попередній аналіз;
2. Формування Парето-оптимальних рішень з використанням ГА;
3. Визначення вагових коефіцієнтів за допомогою MAI;
4. Вибір єдиного оптимального варіанту мережі з використанням методів цілочисельного програмування.

Таким чином, були розроблені теоретичні основи розробки інструменту підтримки прийняття рішень для завдань, що виникають при проектуванні нових або модифікації існуючих телекомунікаційних мереж різного типу, які відрізняються від існуючих можливістю забезпечення автоматизації процесів, що дозволить значно знизити ризики прийняття неправильного рішення інженером-планувальником. Всі запропоновані моделі відрізняються від відомих тим, що адаптовані для використання в процедурах еволюційного моделювання.

4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

4.1. Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	60	59	60
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		59,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	70	66
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	67,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [20]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 59,7$, $k_{теор} = 67,0$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 59,7 + 0,4 \cdot 67,00 = 62,60 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ», даний рівень становить 62,60 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2. Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам,

технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [20]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 18550,00 \cdot 7 / 21 = 5409,11 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник	18550,00	772,73	7	5409,11
Інженер-дослідник	17750,00	750,00	24	18000,00
Консультант з проблем оптимізації процесів	18000,00	681,82	5	3409,10
Технік	8200,00	390,48	11	4295,24
Всього				31113,45

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [20];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,15 / (21 \cdot 8) = 60,24 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 60,24 \cdot 8,50 = 512,02 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця інженера-дослідника	8,50	2	1,10	60,24	512,02
Інсталяція програмного забезпечення моделювання	6,90	3	1,35	73,93	510,11
Введення програмних блоків	6,20	4	1,50	82,14	509,29
Налагодження програмних блоків	9,00	5	1,70	93,10	837,86
Тестування системи	13,00	5	1,70	93,10	1210,24
Всього					3579,51

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доо}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доо}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доо}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доо}} = (31113,45 + 3579,51) \cdot 11 / 100\% = 3816,23 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (31113,45 + 3579,51 + 3816,23) \cdot 22 / 100\% = 8472,02 \text{ грн.}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 176,00 \cdot 1,1 - 0 \cdot 0 = 580,80 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір А4 500	176,00	3,0	0	0	580,80
Папір для записів А4 250 (75%)	102,00	5,0	0	0	561,00
Органайзер офісний	163,00	2,0	0	0	358,60
Набір офісний (канцелярське приладдя)	203,00	3,0	0	0	669,90
Картридж для принтера	986,00	1,0	0	0	1084,60
Диск оптичний CD-R	22,70	3,0	0	0	74,91
Flesh-пам'ять 64 GB	239,00	1,0	0	0	262,90
Тека для паперів	85,00	4,0	0	0	374,00
Всього					3966,71

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_{ε}), які використовують при проведенні НДР на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» відсутні.

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.8)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 52289,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 57517,90 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.7 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Комп'ютерне обладнання для вирішення проблем оптимізації процесів EOM HP Z6 G4 WKS Tower / Xeon Silver 4108 (6QP06EA)	1	52289,00	57517,90
Всього			57517,90

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{npz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де C_{npz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 9860,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 10846,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Математичне середовище MatLab	1	9860,00	10846,00
Прикладне ПЗ Mathematica	1	7580,00	8338,00
Всього			19184,00

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{C_{об}}{T_{\epsilon}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.10)$$

де $C_{об}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_{ϵ} – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (18650,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 518,06 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер розробника ПЗ	18650,00	3	1	518,06
Робоче місце інженера-дослідника	7840,00	5	1	130,67
Пристрої передачі даних	6700,00	4	1	139,58
Оргтехніка	9500,00	5	1	158,33
Приміщення лабораторії розробки ПЗ	245000,00	30	1	680,56
ОС Windows	8320,00	3	1	231,11
Прикладний пакет Microsoft Office	7460,00	3	1	207,22
Всього				2065,53

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.11)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,42 \cdot 190,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 876,20 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер розробника ПЗ	0,42	190,0	876,20
Комп'ютерне обладнання для вирішення проблем оптимізації процесів ЕОМ HP Z6 G4 WKS Tower / Xeon Silver 4108 (6QP06EA)	0,36	190,0	751,03
Робоче місце інженера-дослідника	0,12	190,0	250,34
Пристрої передачі даних	0,10	190,0	208,62
Оргтехніка	0,56	2,5	15,37
Всього			2101,57

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ив}}}{100\%}, \quad (4.12)$$

де $H_{\text{ив}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{ив}} = 50\%$.

$$I_{\text{в}} = (31113,45 + 3579,51) \cdot 50 / 100\% = 17346,48 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 100\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (31113,45 + 3579,51) \cdot 100 / 100\% = 34692,96 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{\text{заг}} = Z_o + Z_p + Z_{\text{од}} + Z_n + M + K_{\text{в}} + B_{\text{спец}} + B_{\text{прз}} + A_{\text{обл}} + B_e + B_{\text{св}} + B_{\text{сп}} + I_{\text{в}} + B_{\text{нзв}}. \quad (4.14)$$

$$B_{\text{заг}} = 31113,45 + 3579,51 + 3816,23 + 8472,02 + 3966,71 + 0,00 + 57517,90 + 19184,00 + 2065,53 + 2101,57 + 0,00 + 0,00 + 17346,48 + 34692,96 = 183856,36 \text{ грн.}$$

Загальні витрати $3B$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$3B = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (4.15)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$3B = 183856,36 / 0,95 = 193533,01 \text{ грн.}$$

4.3. Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.16)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Приймемо $I = 3$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть

використовуватись частково; $n=2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n=3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n=3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R=4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R=3$; якщо нижче відомих результатів, то $R=1$. Прийmemo $R=4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 193533,01$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [20].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 3^3 \cdot 2 \cdot 4 / 193,5 \cdot 0,08 = 13,39.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4. Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» складають 193533,01 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВОК

У даній роботі була реалізована задача підбору оптимальних варіантів розроблення систем керування мереж мобільного зв'язку на етапі її планування з урахуванням комплексу якісних показників. Відмінною рисою є формалізоване врахування сукупності технічних і економічних вимог на всіх етапах проектування, що дозволяє знаходити оптимальні проектні рішення по Парето, що відображають оптимальні варіанти побудови мережі на основі сукупності якісних показників. Такий підхід дозволяє виключити найгірші сценарії розвитку подій і скорочує кількість перепланувань мережі на етапі її експлуатації.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Удосконалено методи багатокритеріальної оптимізації на основі оптимальності Парето для вирішення завдань короткострокового та довгострокового планування та проектування телекомунікаційних мереж різних типів.
2. Складена методика автоматизації проектування мережі радіодоступу, що дає можливість проводити розрахунки по обраній місцевості в автоматичному режимі.
3. Синтезовано гібридний алгоритм знаходження оптимального рішення на основі використання багатокритеріальних методів оптимізації, еволюційного моделювання, методів аналізу ієрархій.
4. Удосконалено математичний апарат та інструментальні засоби для автоматизації процесу проектування, особливістю якого є використання розроблених методів, що дозволяє знаходити більш точні рішення прикладних задач в обмежений час. Автоматизоване планування скорочує час, необхідний для розробки мережевого плану, на 80%, а також підвищує ефективність використання ресурсів на 26%, а управління ризиками на 19%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hou, Y. T., Shi, Y., Serali, H. D. Applied Optimization Methods for Wireless Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. — 475 p.
2. Papadimitriou, C. H., Steiglitz, K. Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity. Mineola, NY: Dover Publications, 1998. — 496 p.
3. Boyd, S., Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. — 716 p.
4. Сергеев, Г. В., Петров, О. В. Оптимізація телекомунікаційних систем з використанням багатокритеріального підходу. Київ: КНУТД, 2021. — 289 с.
5. Bazaraa, M. S., Serali, H. D., Shetty, C. M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2006. — 864 p.
6. Zappaterra, L., et al. "Optimization Techniques in 5G Networks: Resource Allocation and Energy Efficiency." In: 5G System Design: Architectural and Functional Considerations and Long-Term Research. Ed. by Patrick Marsch, Ömer Bulakci, Özgü Alay. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. — P. 285–320.
7. Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем: підручник. За загальною редакцією Захарченко М.В / Захарченко М.В., Горохов С.М., Балан М.М., Гаджієв М.М., Корчинський В.В., Ложковський А.Г. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2010. – 240 с.
8. Ю.Д. Попов, В.І. Тюптя, В.І. Шевченко Методи оптимізації Навчальний електронний посібник. – К.:Електронна бібліотека факультету кібербезпеки, 203. –218 С.
9. Сікора Я. Б. Методи оптимізації. Навчально-методичний посібник для студентів напряму Інформатика. – Житомир: Вид-во ЖДУім. Івана Франка, 2012. – 82 с.
10. В.К.Стеклов, Л.Н. Беркман «Нові інфокомунікаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій» - К.: Техніка, 2004.
11. Балашов В.О. Проектування, будівництво та експлуатація мереж

ширококуткового доступу: навч. посіб. з дипломного проектування та виконання магістерських робіт / В.О. Балашов, І.Б. Барба, В.І. Корнійчук та ін. – Одеса: РВЦ ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. –240 с.

12. Rappaport, T. S., Heath, R. W., Daniels, R. C., Murdock, J. N. Millimeter Wave Wireless Communications. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2015. — 736 p.

13. Zhang, Q., Li, M. Optimization for Wireless Communication Networks. Singapore: Springer, 2021. — 268 p.

14. Debbah, M., Björnson, E., Hoydis, J. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. — 402 p.

15. Sharma, S., Singh, R. K., Sah, S. Optimization in Wireless Networks: Concepts and Techniques. New Delhi: CRC Press, 2022. — 312 p.

16. Chiang, M., Low, S. H., Calderbank, A. R., Doyle, J. C. Networked Life: 20 Questions and Answers. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. — 496 p.

17. Calabuig, D., Monserrat, J. F., Guijarro, L. Multi-Criteria Optimization in Wireless Communication Networks. Singapore: Springer, 2019. — 245 p.

18. López-Valcarce, R., et al. Optimization and Resource Allocation in Wireless Networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. — 322 p.

19. Buzzi, S., Poor, H. V., Zappone, A. Energy-Efficient Wireless Communications: A Multi-Objective Perspective. Boca Raton: CRC Press, 2019. — 358 p.

20. Тимченко, І. В., Лебедев, А. С. Методи багатокритеріальної оптимізації для телекомунікаційних задач. Харків: ХНУРЕ, 2019. — 270 с.

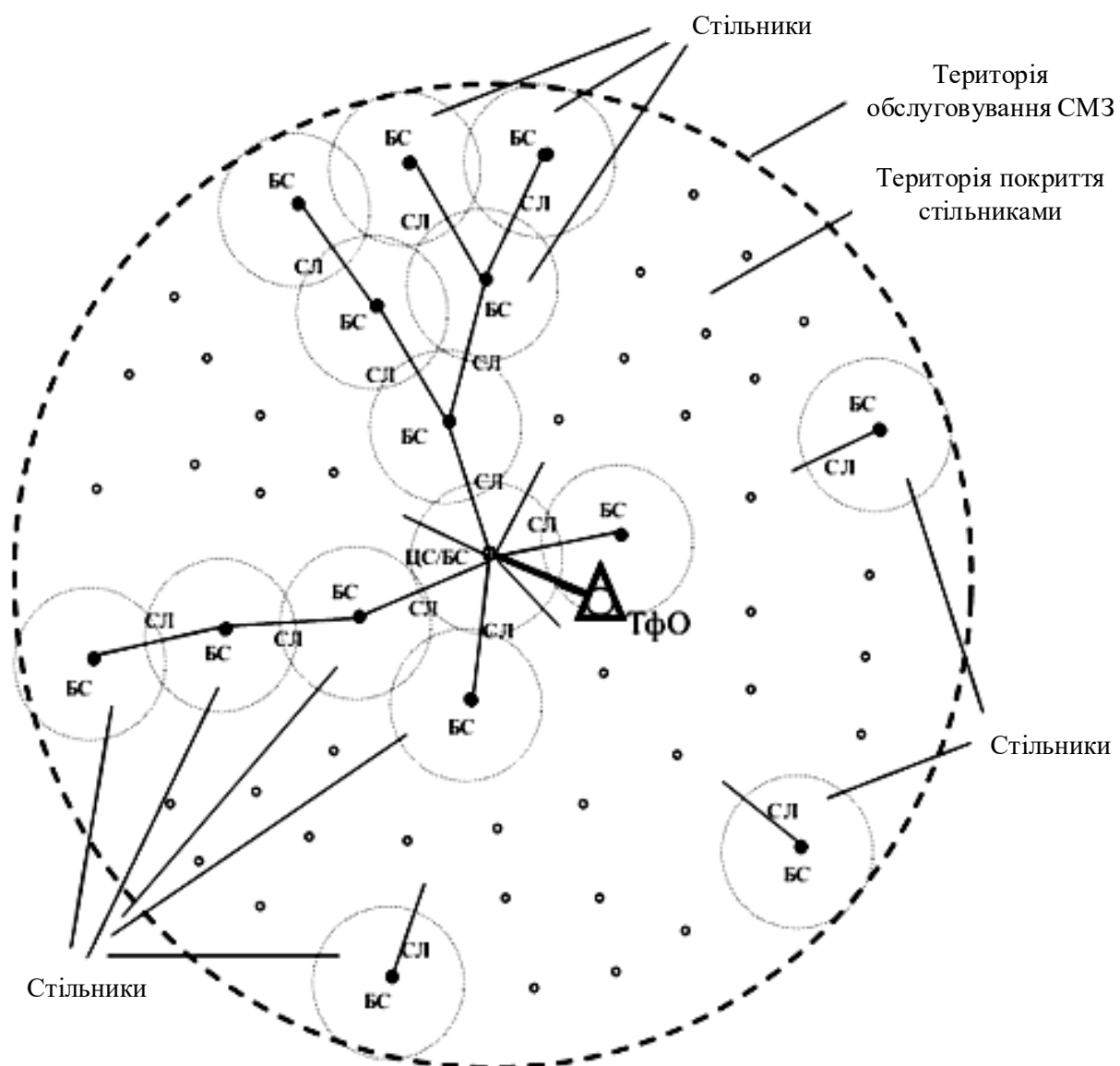
21. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

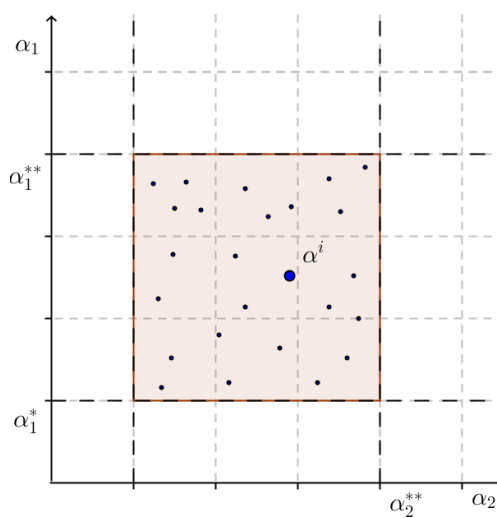
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

Багатокритеріальна оптимізація систем керування ТКМ
назва магістерської кваліфікаційної роботи

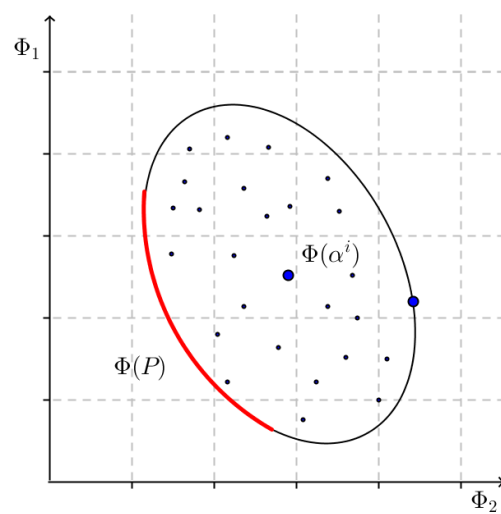
Загальна будова системи стільникового радіозв'язку



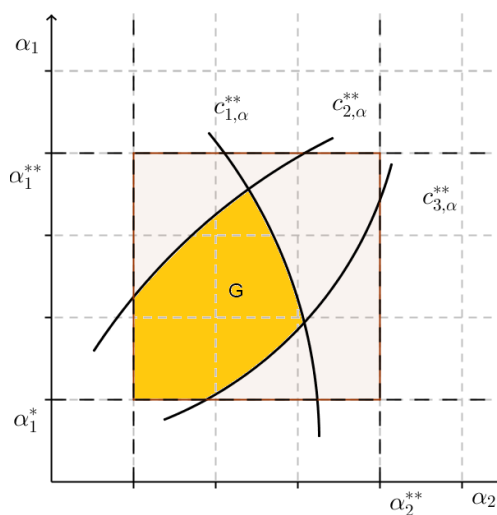
Побудова комплексу рішень



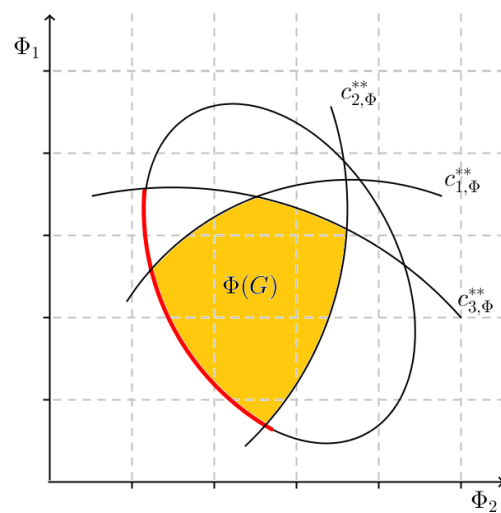
а



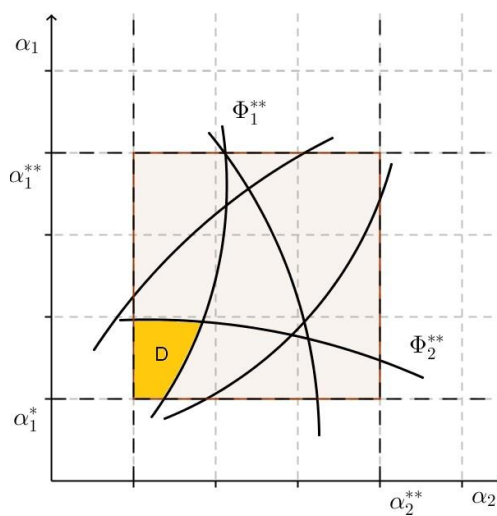
б



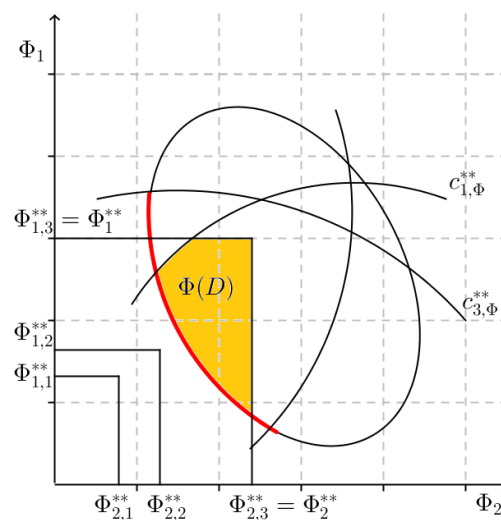
в



г

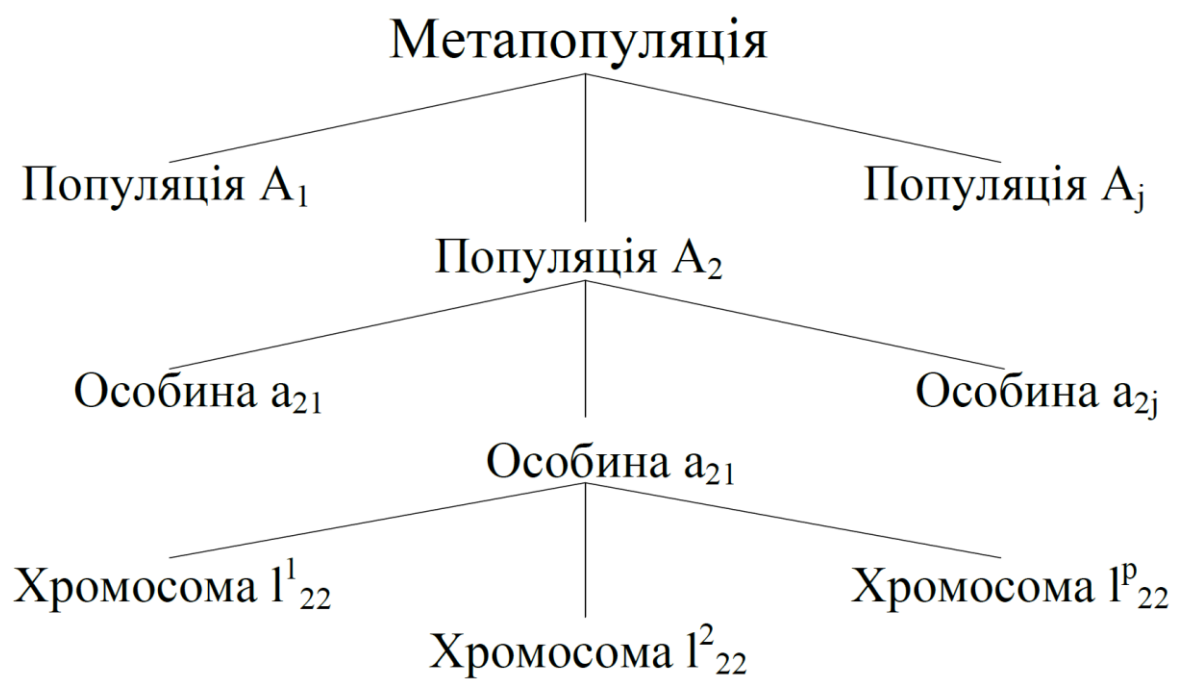


д

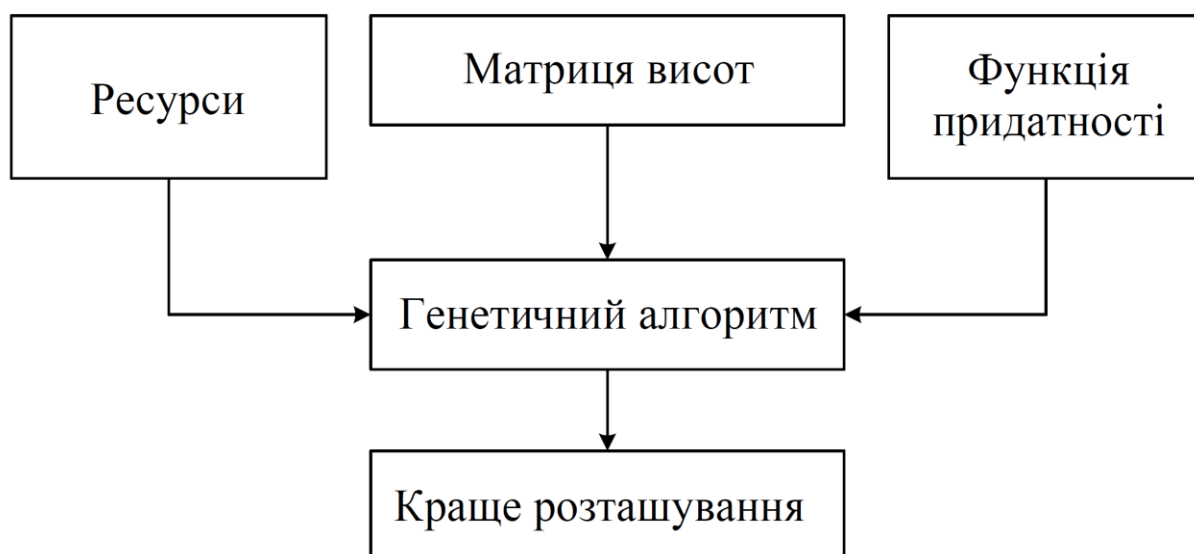


е

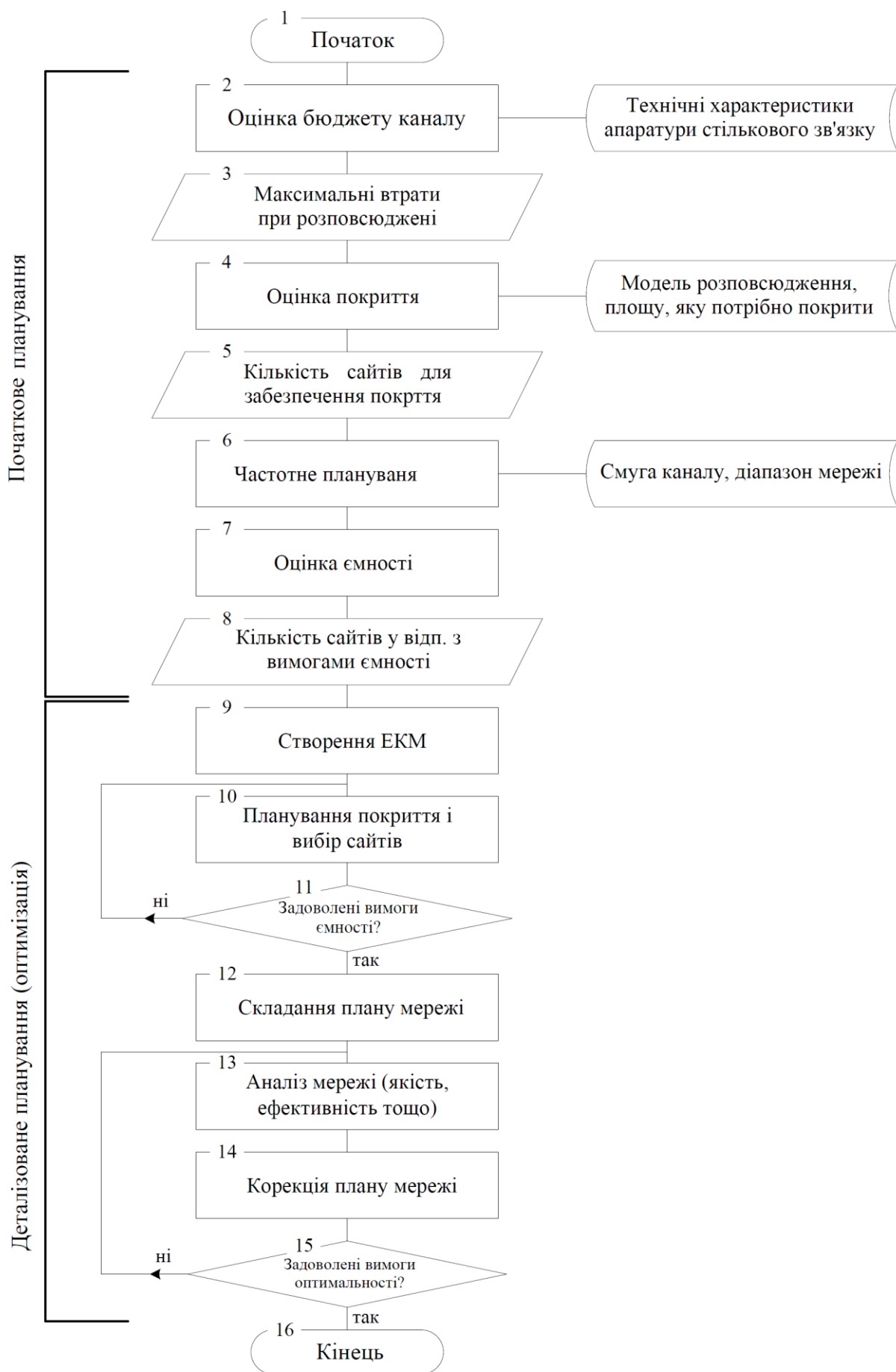
Структура еволюційного представлення бездротової мережі



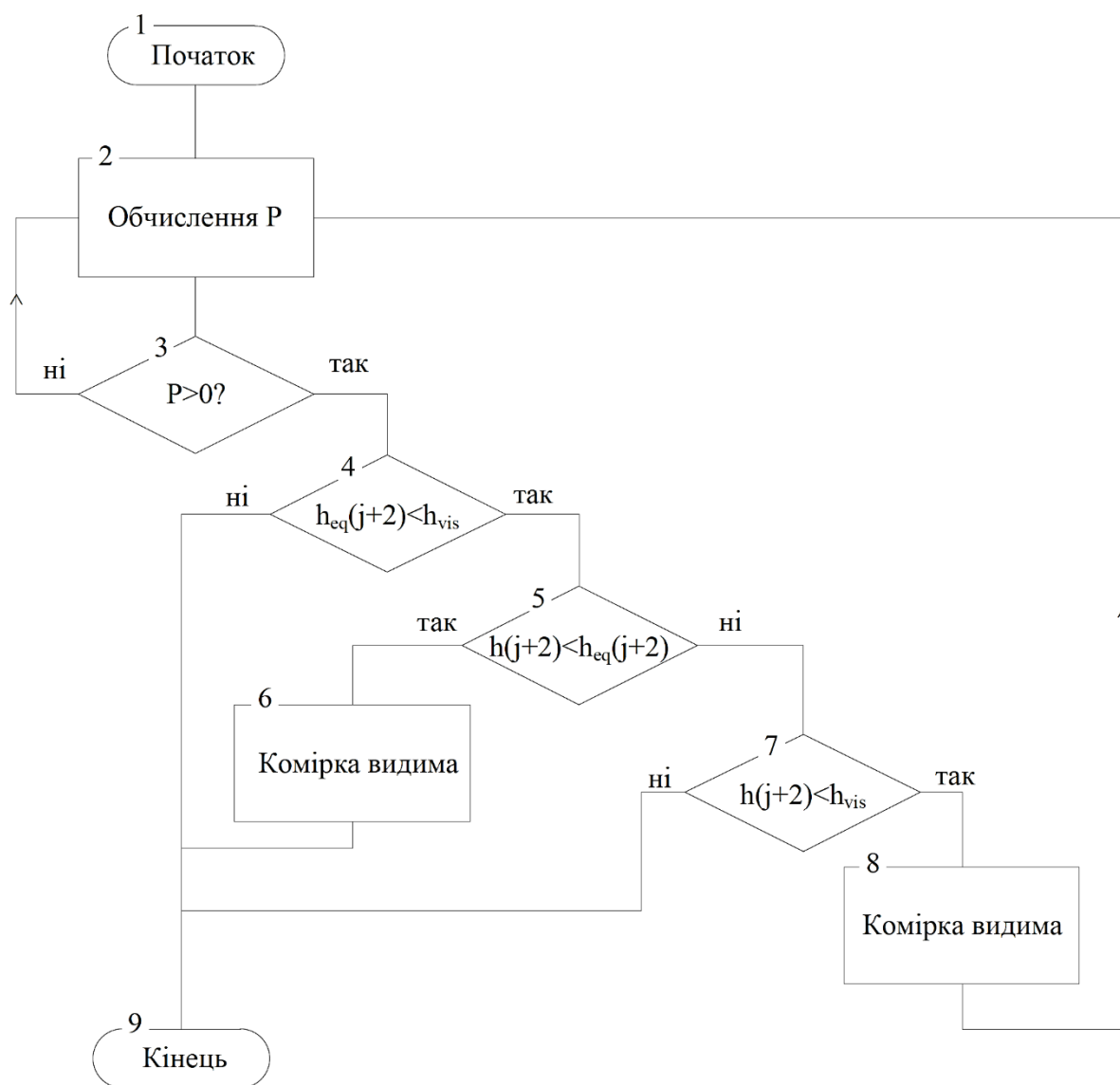
Загальна схема отримання оптимального рішення



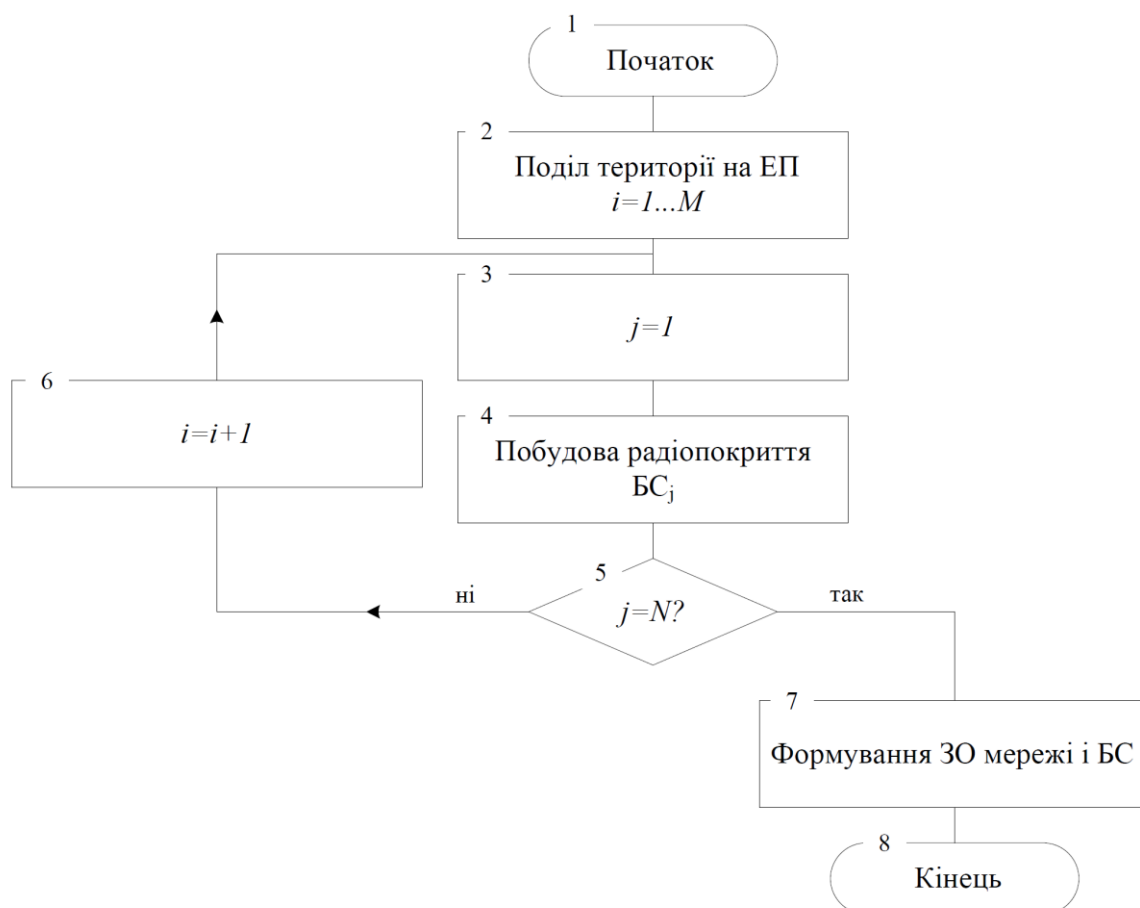
Планування мережі LTE



Алгоритм оцінки видимості комірок



Блок-схема алгоритму побудови зон обслуговування



Структурна схема алгоритму побудови радіопокриття БС

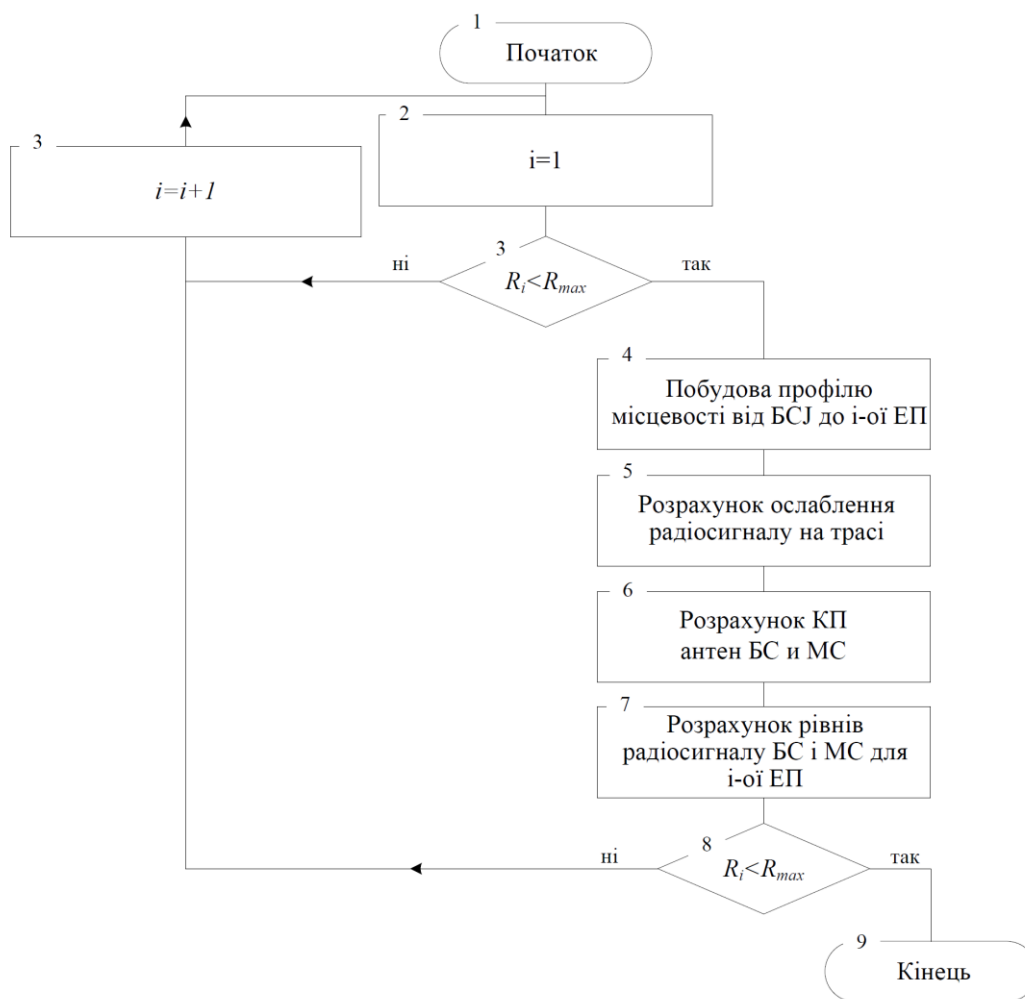
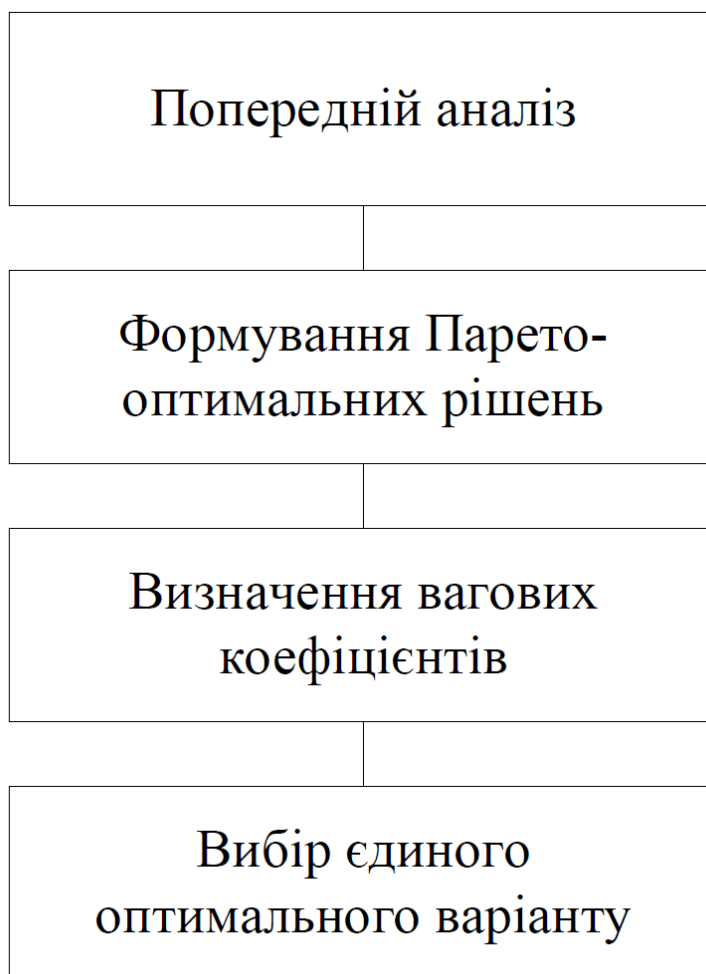


Схема пошуку рішення



(прізвище, ініціали, посада)