

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР «МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ»

НАУКОЄМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Колективна монографія

Під загальною редакцією
В.М. Безрука, Л.С. Глоби, О.Є. Стрижака

Київ

2019

УДК 621.391+004.7

НЗ4

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного центру «Мала академія наук України» (протокол № 1 від 15 січня 2019 року), науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 2 від 25.06.2018 р.)

Рецензенти:

Бараннік В.В., д.т.н., проф., начальник кафедри бойового застосування та експлуатації АСУ Харківського Національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба; Климаш М.М., д.т.н., проф., завідувач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

НЗ4

Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах : монографія / Під загальною редакцією В.М. Безрука, Л.С. Глоби, О.Є. Стрижака. – К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 194 с.
ISBN 978-617-7734-02-3

В монографії викладені сучасні результати досліджень ряду авторів з наукоємних технологій оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах. Розглядаються особливості методів багатокритеріальної оптимізації систем з урахуванням сукупності показників якості, а також особливості та результати вирішення задач управління при передачі та обробці інформації для різних типів інфокомунікаційних мереж.

УДК 621.391+004.7

© Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019

© Харківський національний університет радіоелектроніки, 2019

© Національний центр «Мала академія наук України», 2019

ISBN 978-617-7734-02-3 © Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019

ЗМІСТ

	Вступ	4
1	МЕТОДИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М.</i>	7
2	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ПРОЕКТНИХ ВАРІАНТІВ ПРИ ПЛАНУВАННІ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М., Чеботарьова Д.В.</i>	27
3	ВИБІР ПЕРЕВАЖНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ <i>Безрук В.М., Власова В.О., Скорик Ю.В.</i>	47
4	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М., Гальченко К.Р.</i>	83
5	КЕРУВАННЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ <i>Скулиш М.А., Суліма С.В.</i>	97
6	ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕНЬ У ДАТА–ЦЕНТРИ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ <i>Гвоздецька Н.А., Глоба Л.С., Прокопець В.А., Степурін О.В.</i>	127
7	ДИНАМІЧНИЙ РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ У ВІРТУАЛІЗОВАНИЙ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ОПЕРАТОРА УКРАЇНИ З ПІДВИЩЕННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ДАНИХ <i>Гвоздецька Н.А., Глоба Л.С., Прокопець В.А.</i>	151
8	МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ХЕНДОВЕРУ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ <i>Глоба Л.С., Кірющкін Р.О., Курдеча В.В.</i>	177

ВСТУП

Інфокомунікації – сучасна концепція конвергентної взаємодії телекомунікацій та інформаційних технологій з метою забезпечення своєчасної якісної передачі та обробки інформації.

Із впровадженням у світі технологій 4G LTE та розвитком тенденції переходу до технологій 5G постає питання збільшення швидкості та ефективності передачі та обробки даних. Все більшого поширення набувають сервіси Internet of Things (Інтернет речей) та сервіси міжмашинної взаємодії (M2M). Ці сервіси продукують великі масиви даних у режимі реального часу, що тягне за собою появу концепції BigData. Поряд із цим у світі гостро стоїть проблема економії електроенергії, що наразі споживається центрами обробки даних у величезних обсягах.

Такі виклики сучасного світу інфокомунікацій спричиняють необхідність пошуку нових наукоємних технологій оптимізації та управління при вирішенні задач планування та проектування інфокомунікаційних мереж. В монографії викладені деякі сучасні результати досліджень ряду авторів з питань оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах з урахуванням сукупності техніко-економічних вимог, включаючи швидкість передачі та обробки даних, енергоефективність, оптимальне використання ресурсів та інше. Це визначає актуальність опублікування даної колективної монографії, в якій викладені деякі результати досліджень авторів по вирішенню задач оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах з використанням сучасного математичного апарату та високоефективних обчислювальних засобів. Кожен розділ монографії являє собою завершене викладення результатів досліджень, отриманих авторами цього розділу.

Матеріали 1 розділу підготував Безрук В.М. У цьому розділі розглядаються деякі особливості методів багатокритеріальної оптимізації, що використовуються при розв'язанні різних типів задач оптимізації проектних рішень у мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості. Наведено методи вирішення багатокритеріальних задач оптимізації при застосуванні безумовного критерію переваги, що приводить до отримання підмножини Парето-оптимальних рішень на множині допустимих варіантів. Для звуження підмножини Парето до єдиного переважного проектного варіанту застосовується умовний критерій переваги. Розглянуто різні методи формування умовного критерію переваги з урахуванням додаткової інформації від експертів, що дають можливість звуження підмножини Парето до єдиного переважного рішення. У наступних розділах 2 – 4 наводяться деякі приклади, що ілюструють практичні особливості використання розглянутих методів при багатокритеріальному аналізі і виборі оптимальних проектних варіантів для різних засобів зв'язку.

Матеріали 2 розділу підготували Чеботарьова Д.В., Безрук В.М. У цьому розділі розглянуто особливості застосування методів багатокритеріальної

оптимізації на етапі номінального планування радіомережі системи стільникового мобільного зв'язку (СМЗ) 2-го та 3-го покоління. Вирішена задача оптимізації радіомережі СМЗ як задача дискретного вибору Парето-оптимальних проектних варіантів при врахуванні сукупності показників якості. Розглянуто також особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при номінальному плануванні транспортної мережі СМЗ. Наведені результати вибору оптимальної топології транспортної мережі СМЗ з урахуванням сукупності показників якості.

Матеріали 3 розділу підготували Безрук В.М., Скорик Ю.В., Власова В.О. У даному розділі розглянуто особливості вибору переважного проектного варіанту з урахуванням сукупності показників якості при застосуванні умовного критерія переваги, що заснований на використанні методу аналізу ієрархій (МАІ). Цей метод полягає в отриманні суджень експертів по парним порівнянь різних елементів проблеми вибору. В результаті обробки цих даних за строго формалізованими процедурами обчислюється вектор глобальних пріоритетів, компоненти якого визначають пріоритетність вибору переважного варіанту системи. Досліджено практичні особливості застосування МАІ для вибору переважного варіанту на прикладі різних типів засобів зв'язку, зокрема, мовних кодеків для ІР телефонії, системи масового обслуговування заявок у вузлах комутації мережі, проектних варіантів систем мобільного зв'язку 3-го покоління, технологій мобільного зв'язку 4-го покоління, типів мобільних телефонів, протоколів маршрутизації в ad-hoc мережах, модуляції в цифрових системах зв'язку, систем телевізійного мовлення стандартів DVB-T і ATSC, протоколів маршрутизації в бездротовій сенсорно-актуаторній мережі.

Матеріали 4 розділу підготували Безрук В.М., Гальченко К.Р. У даному розділі розглядаються особливості математичного формулювання та вирішення задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Оскільки, практичні умови роботи мереж зв'язку вимагають врахування декількох показників якості (метрик) при виборі оптимальних маршрутів, тому розглянуто багатокритеріальний підхід до вирішення задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Наведено метод формування підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутизації, що дають можливість організації багатошляхової маршрутизації у мережі зв'язку. Наводиться приклад вирішення задачі оптимальної маршрутизації у мультисервісній мережі зв'язку з урахуванням сукупності показників якості.

Матеріали 5 розділу підготували Скулиш М.А., Суліма С.В. У даному розділі запропоновано алгоритм оптимального розподілу ресурсів у віртуалізованих мережах. Метою алгоритму надання ресурсів є виділення достатньої їх кількості для мережевих функцій, так що їх SLA можна задовольнити навіть у присутності пікового навантаження. В основі будь-якого алгоритму надання ресурсів лежать два питання: скільки ресурсів надавати і коли. Ці питання глибоко досліджуються авторами розділу.

Матеріали 6 розділу підготували Глоба Л.С., Степурін О.В., Гвоздецька Н.А., Прокопеч В.А. У даному розділі запропоновано підхід до підвищення енергоефективності обчислень для серверного кластера як інформаційно-телекомунікаційної одиниці інфраструктури ЦОД, який відрізняється одночасним врахуванням параметрів енергоефективності та продуктивності при розподілі задач. Розроблено алгоритм підвищення енергоефективності обчислень на основі запропонованого підходу, який складається з етапу попередньої індивідуальної атестації серверного кластера та етапу енергоефективного розподілу задач. Врахування індивідуальних залежностей енергоспоживання серверів від їх завантаженості є основною відмінною рисою запропонованого підходу.

Матеріали 7 розділу підготували Глоба Л.С., Прокопеч В.А., Гвоздецька Н.А. У даному розділі проаналізовано ефективність методу динамічного розподілу ресурсів у віртуалізованій мережі мобільного оператора України з використанням механізмів підвищення енергоефективності обробки даних. Основною метою методу динамічного розподілу ресурсів є підтримка обсягу ресурсів, достатнього для виконання вимог SLA (Service Level Agreement – Угода про рівень обслуговування) при уникненні надмірності. Це дозволяє більш ефективно використовувати апаратні ресурси для економії електроенергії та зменшення викидів CO₂. Ефективність методу перевірено для віртуалізованого ядра EPC (Evolved Packet Core) мережі мобільного зв'язку України. Для додаткового підвищення енергоефективності обробки даних у дослідженні застосовано підхід PCPB (Power Consumption and Performance Balance), який запропоновано у розділі 6.

Матеріали 8 розділу підготували Кірюшкін Р.О., Курдеча В.В., Глоба Л.С. У даному розділі проведено огляд основних методів вертикального хендвера та зроблений висновок про неефективність існуючих рішень у бездротових гетерогенних мережах з багатокласовими груповими викликами мобільних вузлів. Описано модифікацію методу вертикального хендвера за рахунок зміни алгоритму прийняття рішень для різних типів викликів мобільного вузла що дозволило підвищити ефективність зв'язку у гетерогенних безпроводових мережах. Розглянуто створену математичну модель алгоритму прийняття рішення, який застосовує методи TOPSIS і MULTIMOORA. Проведено імітаційне моделювання методу прийняття рішення, який базується на запропонованій математичній моделі та доведено його ефективність у гетерогенних бездротових мережах.

2. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ПРОЕКТНИХ ВАРІАНТІВ ПРИ ПЛАНУВАННІ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Безрук В.М., Чеботарьова Д.В.

При плануванні мобільного зв'язку визначається структура та параметри системи мобільного зв'язку (СМЗ), від яких залежать потенційні техніко-економічні характеристики системи [1-3]. Це визначає необхідність врахування на строгому формалізованому рівні сукупності показників якості при виборі проектних варіантів на етапі планування СМЗ. В даному розділі розглянуто особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації на етапі номінального планування системи стільникового мобільного зв'язку [4-6]. Вирішена задача оптимізації радіомережі СМЗ як задача дискретного вибору оптимальних проектних варіантів при врахуванні сукупності показників якості. Проаналізовані багатовимірні потенційні характеристики і багатовимірні діаграми обміну показників якості СМЗ. Розглянуто також особливості багатокритеріальної оптимізації при номінальному плануванні транспортної мережі СМЗ. Наведені результати вибору оптимальної топології транспортної мережі СМЗ з урахуванням сукупності показників якості.

2.1. Оптимізація радіомережі СМЗ 2-го покоління з урахуванням сукупності показників якості

Розглянемо практичні особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при номінальному плануванні стільникових мереж мобільного зв'язку (СМЗ). Знаходження оптимальних варіантів радіомережі при номінальному плануванні СМЗ із урахуванням сукупності показників якості включає такі стадії:

- задання вихідної множини варіантів мережі, які відрізняються даними по території, що обслуговується, виділеній смузі частот, кількості абонентів;
- виділення множини припустимих варіантів з урахуванням обмежень на структуру й параметри мережі, а також обмежень на значення показників якості;
- вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів мережі з використанням безумовного критерію переваги;
- аналіз отриманих Парето-оптимальних варіантів мережі,
- оцінювання їх багатовимірних потенційних характеристик і багатовимірних діаграм обміну показників якості;
- вибір єдиного переважного варіанта мережі з підмножини Парето з використанням умовного критерію переваги.

При дослідженнях було сформовано множину допустимих варіантів радіомережі СМЗ 2-го покоління, що визначалися різними даними за кількістю абонентів у мережі, розміру території, що обслуговується, активністю абонентів, виділеною смугою частот, розміром кластерів, потужністю передавачів базових

станцій (БС), припустимою ймовірністю блокування викликів, відсотком часу погіршення якості зв'язку.

При цьому розраховано основні технічні параметри СМЗ:

1. Загальне число частотних каналів, що виділяються для розгортання СМЗ

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (2.1)$$

де F_k – смуга частот, займана одним частотним каналом СМЗ.

2. Число радіочастот, необхідне для обслуговування абонентів в одному секторі кожного стільника

$$n_s = \text{int}(N_k / C * M) \quad (2.2)$$

3. Величина припустимого телефонного навантаження в одному секторі одного стільника або в соті (для БС, що має антени із круговою діаграмою спрямованості), що визначається співвідношеннями

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - (P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_0 / 2})^{1/n_0}} \right], \text{ при } P_{\text{бл}} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (2.3)$$

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln(P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_0 / 2})} - \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \text{ при } P_{\text{бл}} > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (2.4)$$

де $n_0 = n_s n_a$; n_a – кількість абонентів, які одночасно можуть використовувати один частотний канал.

4. Кількість абонентів, що обслуговуються БС, та яке залежить від числа секторів, припустимого телефонного навантаження та активності абонентів

$$N_{\text{аВТС}} = M \text{int}(A/\beta). \quad (2.5)$$

5. Необхідне число БС на заданій території обслуговування

$$N_{\text{БТС}} = \text{int}(N_a / N_{\text{аВТС}}). \quad (2.6)$$

6. Радіус стільника, за умови, що навантаження розподілене по всій зоні рівномірно

$$R = \sqrt{\frac{1,21 S_0}{\pi N_{\text{БТС}}}} \quad (2.7)$$

7. Величина захисної відстані між BTS з однаковими частотними каналами

$$D = R\sqrt{3C}. \quad (2.8)$$

8. Ймовірність помилки в процесі сеансу зв'язку

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{(\sqrt{3}C-1)^{2k}}. \quad (2.9)$$

9. Ефективність використання радіоспектра, обумовлена числом активних абонентів, що приходяться на одиницю смуги частот

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C}. \quad (2.10)$$

У результаті розрахунків розроблено початковий (номінальний) частотно-територіальний план. Розглянуто приклад номінального планування СМЗ, у якому були обрані такі показники якості: ймовірність помилки, ємність мережі, кількість базових станцій у мережі, ефективність використання радіочастотного спектра, ймовірність блокування, площа покриття. Для кожного варіанта СМЗ були знайдені оцінки значень показників якості, проведено їхнє нормування до максимальних значень і приведення до порівнянного виду. Знаходження підмножини Парето-оптимальних варіантів ССМЗ виконано у просторі оцінок введених показників якості.

Для реалізації основних стадій вибору оптимальних варіантів СМЗ із застосуванням методології багатокритеріальної оптимізації був створений спеціальний програмний комплекс. Даний програмний комплекс виконує формування множини припустимих варіантів СМЗ, вибір підмножини варіантів систем, оптимальних за критерієм Парето, і звуження підмножини Парето до єдиного переважного варіанта із використанням умовного критерію переваги. За допомогою цього програмного комплексу сформована допустима множина із 100 варіантів СМЗ. Для кожного варіанта знайдені оцінки значень вказаних шести показників якості. У критеріальному просторі цих показників була виділена підмножина Парето-оптимальних варіантів, що включає 71 варіант СМЗ. При цьому відкинута 29 безумовно гірших за критерієм Парето варіантів СМЗ. За умови умовного критерію переваги у вигляді мінімуму зваженої суми значень обраних показників якості з підмножини Парето обрано єдиний переважний варіант СМЗ. Цей варіант СМЗ характеризують такі дані: кількість абонентів у мережі – 30000; площа території, що обслуговується – 320 кв.км; активність абонентів – 0,025 Ерл; ширина смуги частот – 4 МГц; припустима ймовірність блокування виклику – 0,01; відсоток часу погіршення якості зв'язку – 0,07; щільність обслуговування – 94 акт. абон./а. км; розмір кластера – 7; кількість базових станцій у мережі – 133; кількість абонентів, що обслуговується однією БС – 226; ефективність використання радіочастотного спектра – $1,614 \cdot 10^{-4}$ акт. Абон./Гц; телефонне навантаження – 3,326 Ерл; ймовірність помилки – $5,277 \cdot 10^{-7}$.

У результаті виконаної Парето-оптимізації отримано також багатовимірні діаграми обміну (БДО) показників якості. Для ілюстрації деякі БДО наведені на рис. 2.1. Кожна точка БДО визначає потенційно найкращі значення кожного з показників, які можуть бути досягнуті при фіксованих, але довільних значеннях інших показників якості.

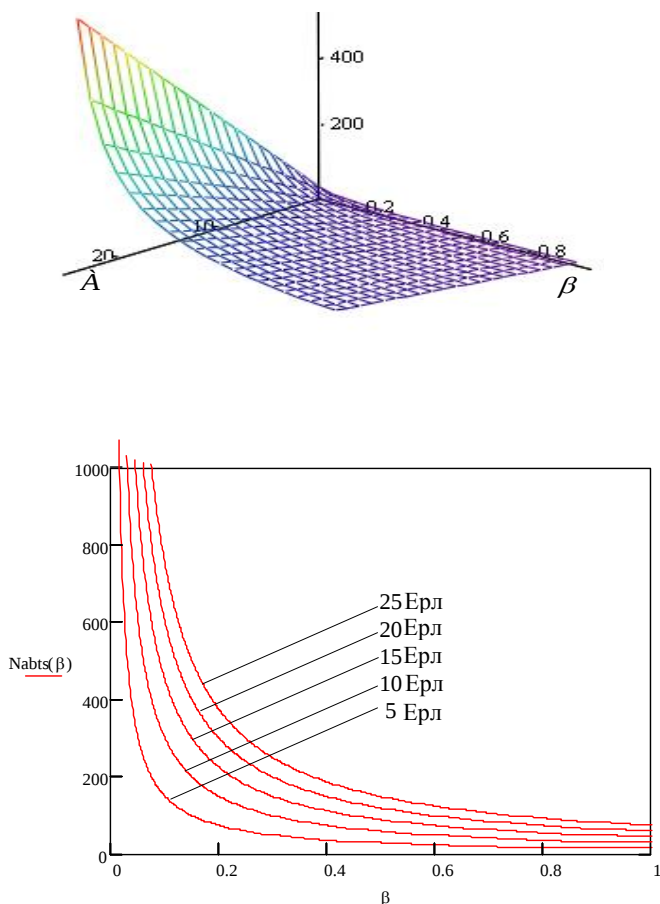


Рис. 2.1. Багатовимірні діаграми обміну показників якості (числа абонентів, що обслуговуються однією БС, навантаження, активності абонентів) для проектуємої СМЗ

2.2. Багатокритеріальний вибір оптимальних варіантів радіомережі СМЗ 3-го покоління на етапі номінального планування

Розглянемо особливості вирішення оптимізаційної задачі на етапі номінального планування СМЗ 3-го покоління з урахуванням сукупності показників якості. При цьому були використані методи багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень, що наведені в розд. 1.

Було сформовано множину з 10 варіантів побудови СМЗ стандарту UMTS, які визначалися такими вихідними даними: кількість абонентів у мережі,

що планується, розміри обслуговуваної території, передбачувана активність абонентів, допустима ймовірність блокування виклику. Значення вихідних і розрахованих параметрів для допустимої множини варіантів мережі представлено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Значення вихідних і розрахованих параметрів СМЗ 3-го покоління

№ ССМС	Вихідні параметри				Розраховані параметри					
	N_a	S_0	$P_{\text{бл}}$	β	N_a/S_0	A	N_{aBTS}	N_{BTS}	R	Γ
1	50000	300	0,1	0,03	166	49,7	4971	11	3,2	$2,2 \cdot 10^{-6}$
2	40000	300	0,05	0,05	133	45,6	2736	15	2,8	$3 \cdot 10^{-6}$
3	45000	280	0,05	0,07	160	45,6	1956	24	2,1	$4,8 \cdot 10^{-6}$
4	50000	290	0,09	0,05	172	48,7	2925	18	2,5	$3,6 \cdot 10^{-6}$
5	48000	250	0,07	0,06	192	47,1	2358	21	2,1	$4,2 \cdot 10^{-6}$
6	42000	290	0,03	0,06	144	43,8	2193	20	2,4	$4 \cdot 10^{-6}$
7	42000	300	0,04	0,06	140	44,8	2241	19	2,5	$3,8 \cdot 10^{-6}$
8	40000	280	0,04	0,05	142	44,8	2688	15	2,7	$3 \cdot 10^{-6}$
9	55000	300	0,02	0,04	183	42,6	3201	18	2,5	$3,6 \cdot 10^{-6}$
10	55000	290	0,02	0,05	189	42,6	2559	22	2,5	$4,4 \cdot 10^{-6}$

При проведенні оптимізації СМЗ всі ці параметри в тій чи іншій мірі можуть характеризувати якість мережі. Вказані параметри приведені до стандартного вигляду показників якості – параметри нормовані до максимального значення та приведені до порівняльного виду. Отримані значення показників якості мережі представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Сукупність стандартних показників якості

№ ССМС	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
	N_a	S_0	$P_{\text{бл}}$	β	N_a/S_0	A	N_{aBTS}	N_{BTS}	R	Γ
1	0,091	0	1	0,571	0,135	0	0	0,458	0	0,542
2	0,273	0	0,5	0,286	0,307	0,082	0,45	0,625	0,125	0,375
3	0,182	0,066	0,5	0	0,166	0,082	0,606	1	0,344	0
4	0,091	0,033	0,9	0,286	0,104	0,02	0,412	0,75	0,219	0,25
5	0,873	0,166	0,7	0,143	0	0,052	0,526	0,875	0,344	0,125
6	0,236	0,033	0,3	0,143	0,25	0,118	0,559	0,833	0,25	0,166
7	0,236	0	0,4	0,143	0,271	0,098	0,549	0,791	0,219	0,208
8	0,273	0,066	0,4	0,286	0,26	0,098	0,459	0,625	0,156	0,375
9	0	0	0,2	0,429	0,047	0,143	0,356	0,75	0,219	0,25
10	0	0,033	0,2	0,286	0,015	0,143	0,485	0,916	0,219	0,083

При вирішенні оптимізаційної задачі серед усіх показників якості були обрані 3 показника якості – k_3 , k_5 і k_8 , які характеризують ймовірність блокування ($P_{\text{бл}}$), щільність обслуговуваних абонентів (N_a/S_0) і необхідну кількість базових станцій у мережі (N_{BTS}) відповідно.

Вибір підмножини Парето-оптимальних проектних варіантів і виключення безумовно гірших варіантів мереж були виконані відповідно до методології, наведеної у розд. 1. Варіант мережі включався в множину Парето, якщо на множині допустимих варіантів були відсутні інші варіанти системи, які домінували його за критерієм Парето. Результати вибору варіантів мережі, оптимальних за критерієм Парето, представлені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Результати вибору Парето-оптимальних варіантів СМЗ 3-го покоління

№ СМЗ	k_3	k_5	k_8	Результати Парето-оптимізації
	$P_{\text{бл}}$	N_a/S_0	N_{BTS}	
1	1	0,135	0,458	Парето-оптимальний варіант
2	0,5	0,307	0,625	безумовно гірший варіант
3	0,5	0,166	1	безумовно гірший варіант
4	0,9	0,104	0,75	безумовно гірший варіант
5	0,7	0	0,875	Парето-оптимальний варіант
6	0,3	0,25	0,833	безумовно гірший варіант
7	0,4	0,271	0,791	безумовно гірший варіант
8	0,4	0,26	0,625	Парето-оптимальний варіант
9	0,2	0,047	0,75	Парето-оптимальний варіант
10	0,2	0,015	0,916	Парето-оптимальний варіант

Як видно з табл. 2.3, підмножина Парето-оптимальних варіантів включає 5 варіантів побудови СМЗ: № 1, № 5, № 8, № 9 та № 10. Решта 5 варіантів мережі є безумовно гіршими і були виключені з подальшого розгляду.

Для ілюстрації проектні варіанти СМЗ представлені в 2-х мірних просторах показників якості – k_3 , k_5 і k_8 . Парето-оптимальним варіантам відповідають ліві нижні границі допустимої множини варіантів.

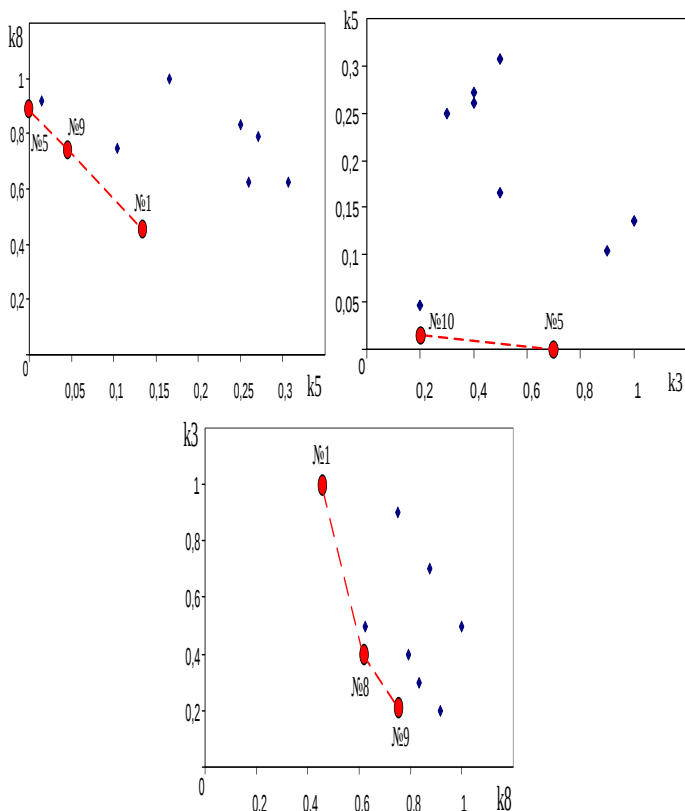


Рис. 2.2. Варіанти СМЗ у критеріальних просторах показників якості

Фактично перехід від однієї Парето-оптимальної точки до іншої являє собою діаграму обміну показників якості (в даному випадку двовимірну діаграму обміну). Кожна точка такої діаграми обміну визначає потенційно найкращі значення одного з показників, які можуть бути досягнуті при фіксованих значеннях інших показників якості.

Для вибору єдиного переважного проектного варіанта з підмножини Парето-оптимальних був використаний метод, заснований на лексикографічному підході. Спочатку весь набір показників якості був впорядкований у порядку важливості. Показник k_3 обраний більш важливим, ніж показники k_5 і k_8 , а показник k_8 вибраний більш важливим, ніж показник k_5 . При порівнянні Парето-оптимальних варіантів СМЗ було використано лексикографічне відношення. При цьому єдиним кращим варіантом виявився варіант СМЗ № 9. Цей варіант характеризується допустимою ймовірністю блокування ($P_{\text{бл}} = 0,02$), досить високою щільністю обслуговуваних абонентів ($N_a/S_0 = 183 \text{ аб./км}^2$) і відносно невеликою кількістю базових станцій ($N_{\text{БТС}} = 18$).

2.3. Особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при плануванні транспортної мережі СМЗ

При плануванні транспортної мережі СМЗ використовують різні показники якості, що враховують: довжини радіорелейних прольотів, загальну довжину мережі, використовувану й резервну пропускну здатність; надійність прольотів; швидкість передачі; використовувану смугу частот; імовірність помилкового прийому бітів (BER), вартісні характеристики.

При плануванні транспортної мережі головним завданням є розробка структури (топології) мережі, що забезпечує взаємодію між всіма вузлами мережі (базовими станціями, базовими контролерами, центром комутації). В результаті планування транспортної мережі необхідно отримати:

- топологію мережі;
- повний список вузлів, ліній, цифрових крос-конекторів;
- сумарний запланований коефіцієнт завантаженості власних і орендованих ліній.

До структури транспортних мереж пред'являються суперечливі техніко-економічні вимоги, що визначає необхідність застосування при їх плануванні методів багатокритеріальної оптимізації. Аналіз літератури, присвяченої плануванню транспортних мереж, показав, що питанням оптимізації транспортних мереж з урахуванням сукупності показників якості приділена недостатня увага.

Мета планування транспортної мережі – поєднати базові станції (BTS) з контролерами радіомережі (BSS) і базовою мережею. Це з'єднання може бути організовано як безпосередньо, так і через інші базові станції, оскільки обладнання BTS має гнучкі можливості побудови мережі передачі різної конфігурації. Можливе створення мереж з топологічними структурами типу «зірка», «ланцюг» та «дерево». Крім того, може бути використана змішана топологія, що включає в себе елементи усіх перерахованих вище топологій.

У відомих підходах до планування транспортної мережі виконують оптимізацію топології мережі, як правило, за одним показником якості, наприклад, по довжині або вартості. При цьому використовують алгоритми пошуку найкоротшого дерева або визначення максимального потоку, зокрема, алгоритми Прима, Краскала, Ісау-Вільямса, Фогеля та ін. При врахуванні двох або більше показників якості з'являються певні труднощі, оскільки показники якості залежать не тільки один від одного, але і від отриманої в результаті топології мережі. Зокрема, пропускну спроможність залежить від того, як BTS з'єднана з BSC (прямо або через інші базові станції).

Тому важливим завданням планування транспортної мережі є вибір оптимальної топології мережі з урахуванням сукупності показників якості. Для оптимізації топологічної структури мережі передачі слід використовувати показники якості, які враховують: довжину радіорелейних прольотів; загальну довжину ланцюга (мережі); кількість ланок в ланцюзі; вартісні характеристики (вартість будівельних робіт, вартість оренди існуючих ліній, вартість обладнання); використовувану й резервну пропускну здатність; показники якості зв'язку (швидкість передачі, коефіцієнт помилок по бітів (BER) та ін.). Оскільки

всі ці показники якості тісно взаємопов'язані і суперечливі, то існує необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації в процесі рішення складних взаємопов'язаних завдань. До них відносяться: оптимізація пропускну здатності каналів зв'язку; вибір оптимальних маршрутів; оптимізація топологічної структури; вибір методів управління потоками та визначення параметрів управління; аналіз обсягів буферної пам'яті у вузлах комутації і маршрутизації і т. д.

У даному розділі розглядаються особливості вирішення задачі оптимізації топології транспортної мережі в три етапи:

- задання початкової допустимої множини варіантів структури (топології) мережі;
- вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів топології транспортної мережі;
- вибір єдиного варіанту топології з підмножини Парето-оптимальних варіантів топології транспортної мережі.

Вихідними даними для вирішення зазначеної оптимізаційної задачі є: план розташування базових станцій, базових контролерів і центру комутації; сукупність показників якості, за якими слід оцінювати допустимі варіанти топології транспортної мережі; довжини можливих прольотів (відстань між вузлами мережі – BTS і BSC), їх вартісні характеристики, необхідні пропускні здібності та ін.

Вибір показників якості та формування множини припустимих варіантів транспортних мереж. При оптимізації транспортних мереж мобільного зв'язку можна використовувати показники якості, які враховують: довжину радіорелейного прольоту; загальну довжину мережі; кількість ланок в ланцюзі; вартісні характеристики: вартість будівельних робіт, вартість оренди існуючих ліній, вартість обладнання та ін; використовувану і резервну пропускну здатність; надійність прольоту; швидкість передачі; смугу частот; ймовірність помилкового прийому біта (BER) і ін.

Множина допустимих варіантів топології транспортної мережі – це всі можливі варіанти топології з урахуванням обмежень на прольоти, де немає радіовидимості чи існують які-небудь причини, що перешкоджають можливості побудови ліній зв'язку на цих ділянках. Вважається, що кожен проліт транспортної мережі в цілому характеризується певною сукупністю показників якості

$$\vec{k}(\phi) = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_m(\phi)) \quad (2.11)$$

При оцінюванні якості вихідної допустимої множини варіантів структури мережі спочатку будемо використовувати скорочену сукупність показників якості

$$\vec{k}(\phi) = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_n(\phi)) \quad (n \leq m). \quad (2.12)$$

Пропонується ввести узагальнений показник якості кожного прольоту у вигляді зваженої суми вибраних показників якості згідно

$$k = \sum_{i=1}^n c_i * k_i, \quad (2.13)$$

де c_i – деякі вагові коефіцієнти, що характеризують важливість кожного показника; n – кількість показників якості.

Далі, в припущенні, що кожен проліт характеризується тепер скалярним показником якості (2.13), за допомогою одного з відомих алгоритмів (Прима, Краскала) знаходиться найкоротше дерево для транспортної мережі. Вибираючи різні допустимі комбінації вагових коефіцієнтів, можна знайти деяку множину допустимих варіантів дерев мережі Φ_d , які визначають різні топології транспортної мережі.

Знаходження підмножини оптимальних по Парето варіантів і її звуження до єдиного проектного варіанту топології транспортної мережі. Для кожного допустимого варіанту топології (структури) транспортної мережі в цілому оцінюються значення повної сукупності показників якості транспортної мережі (2.11). Кожен варіант структури транспортної мережі представляється в критерійному просторі оцінок показників якості. Тут з використанням одного із методів виділяється підмножина оптимальних по Парето варіантів топології транспортної мережі. Парето-оптимальним варіантам топології відповідає множина оптимальних по Парето оцінок в критерійному просторі показників якості (2.11).

Слід зазначити, що при знаходженні підмножини оптимальних по Парето варіантів топології транспортної мережі враховуються показники якості мережі, які залежать від конкретної топології мережі і визначаються через показники якості кожного прольоту мережі.

Для вибору єдиного переважного варіанту з підмножини оптимальних по Парето можна застосувати один з методів звуження підмножини Парето, описаних в розд. 1.

2.4. Вибір оптимальної топології транспортної мережі СМЗ з урахуванням сукупності показників якості

Розглянемо особливості показників якості топології транспортної мережі в рамках рекомендацій ITU-T G.821 і ITU-T G.826, які описують параметри готовності мережі. Зокрема, неготовність апаратури – це такий стан ділянки мережі, при якому протягом десятисекундних інтервалів, що слідують підряд, має місце пропадання сигналу (втрата синхронізації) або коефіцієнт помилок перевищує норму. Причинами, що приводять до неготовності апаратури, можуть бути наступні: ненадійність апаратури; помилки обслуговуючого персоналу; екрануючий вплив перешкоди при субрефракції; вплив гідрометеорів; вплив промислових або атмосферних чинників.

Для транспортних з'єднань BTS з BSC використовують 2-й і 3-й клас якості гіпотетичної моделі тракту короткої ділянки. Для 2-го і 3-го класу якості

коефіцієнт неготовності згідно рекомендації ІТУ-Т G.821 не повинен перевищувати 0,05% в рік. Цей показник має відношення до існуючого ланцюга, що включає 10 базових станцій мережі, підключених до контроллера. При цьому для кожної ланки значення коефіцієнта неготовності дорівнюватиме 0,005%. Якщо тракт складається з послідовно сполучених ділянок, то коефіцієнт неготовності дорівнює сумі коефіцієнтів неготовності окремих ділянок

$$N = \sum N_i, \quad (2.14)$$

а для паралельно сполучених ділянок коефіцієнт неготовності дорівнює добутку коефіцієнтів неготовності окремих ділянок:

$$N = \prod N_i. \quad (2.15)$$

Коефіцієнт готовності дорівнює $D = 1 - N$, так як загальний час роботи устаткування складається з періодів готовності і неготовності.

На рис. 2.3 наведені прості приклади з'єднань BTS, а також неготовність кожної BTS і сумарний відсоток в тракті залежно від типу з'єднань.

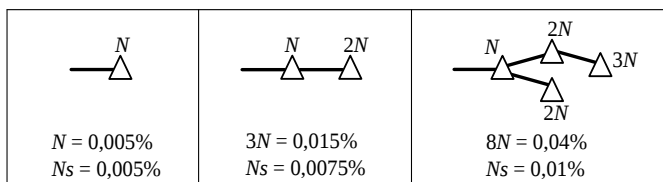


Рис. 2.3. Неготовність кожної BTS і сумарний відсоток в тракті залежно від типу з'єднань

Основним методом захисту від збільшення коефіцієнта неготовності є побудова кільцевої топології. На рис. 2.4 показано зменшення коефіцієнта неготовності BTS при використанні топологій мережі типу “кільце”.

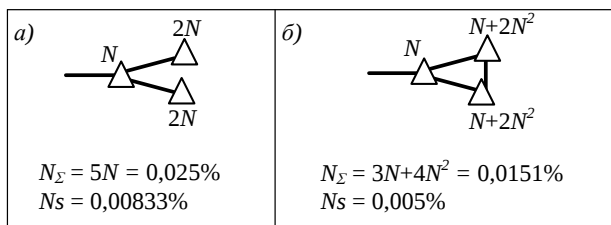


Рис. 2.4. Зменшення коефіцієнта неготовності BTS за рахунок використання конфігурації кільцем

Видно, що використання кільцевої топології (б) зменшує коефіцієнт неготовності в порівнянні з (а) майже в два рази. Проте слід зазначити, що кільцева топологія вимагає додаткового устаткування і сполучних ліній, що приводить до значного збільшення вартості мережі. Тому доцільно виконувати оптимізацію транспортної мережі з урахуванням двох показників якості: коефіцієнта неготовності (готовності) і вартості.

Розглянемо приклад, коли в результаті планування радіомережі СМЗ був отриманий план точного розташування 26 базових станцій і контролера мережі (рис. 2.5). Необхідно знайти оптимальний варіант топології транспортної мережі для організації зв'язку між всіма BTS з урахуванням двох показників якості: коефіцієнта неготовності і відносної вартості.

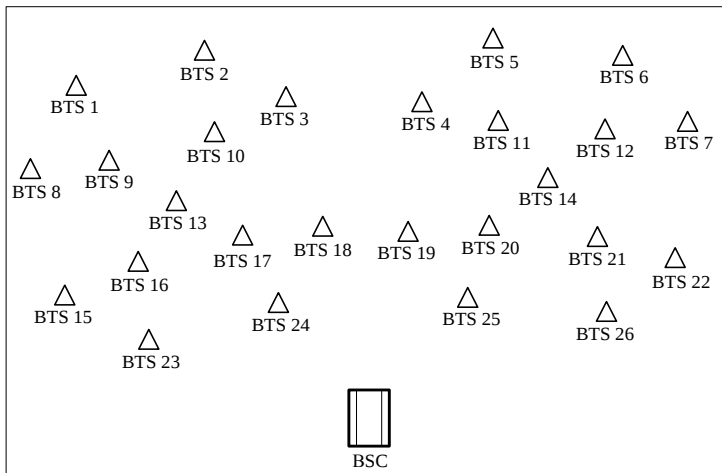


Рис. 2.5. План розташування елементів радіомережі

Для даної радіомережі було сформовано деяку множину різних варіантів топологій транспортної мережі, які представлені на рис. 2.6-2.11.

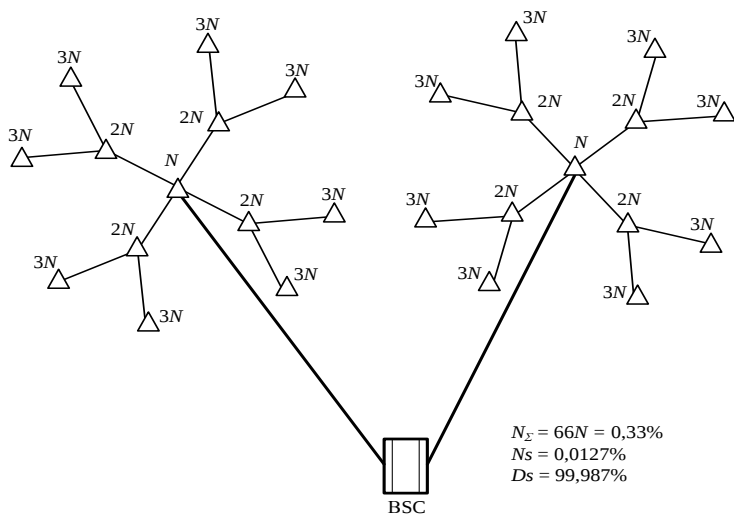


Рис. 2.6. Варіант 1 транспортної мережі

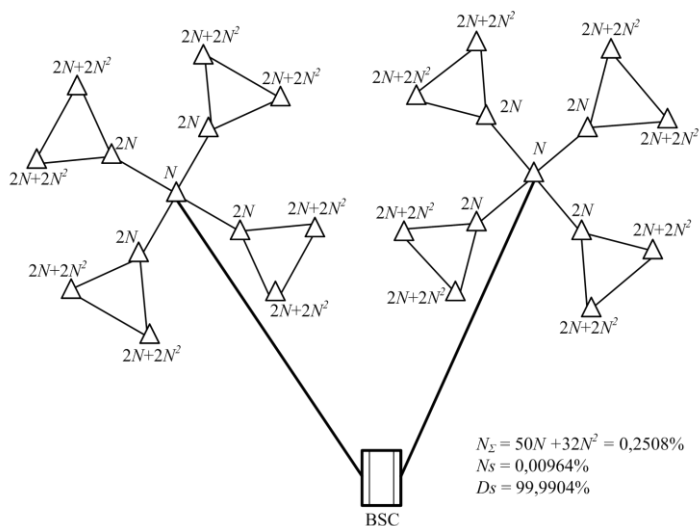


Рис. 2.7. Варіант 2 транспортної мережі

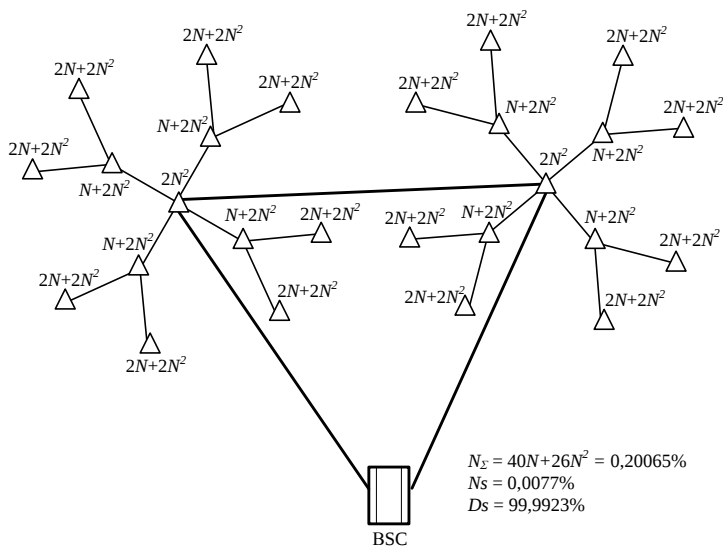


Рис. 2.8. Варіант 3 транспортної мережі

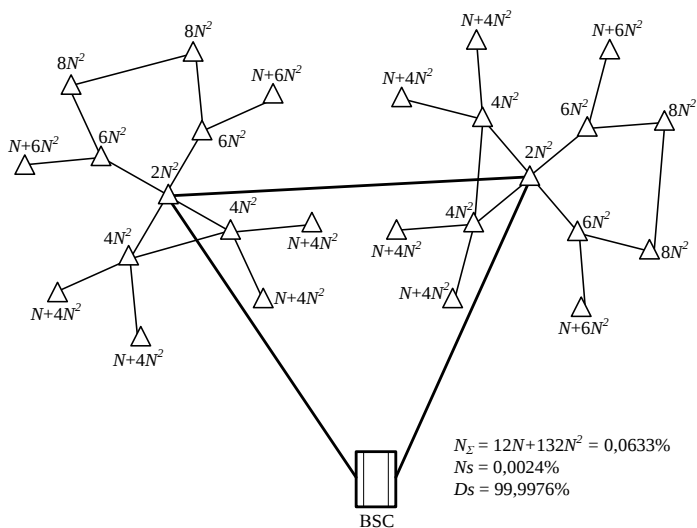


Рис. 2.9. Варіант 4 транспортної мережі

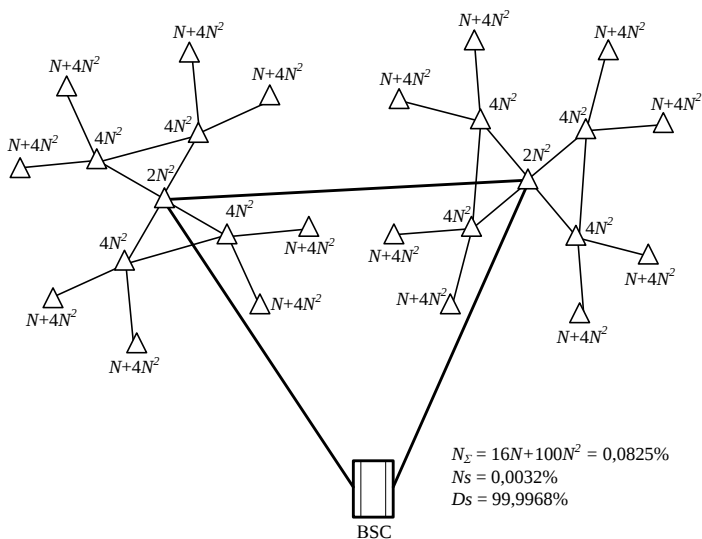


Рис. 2.10. Варіант 5 транспортної мережі

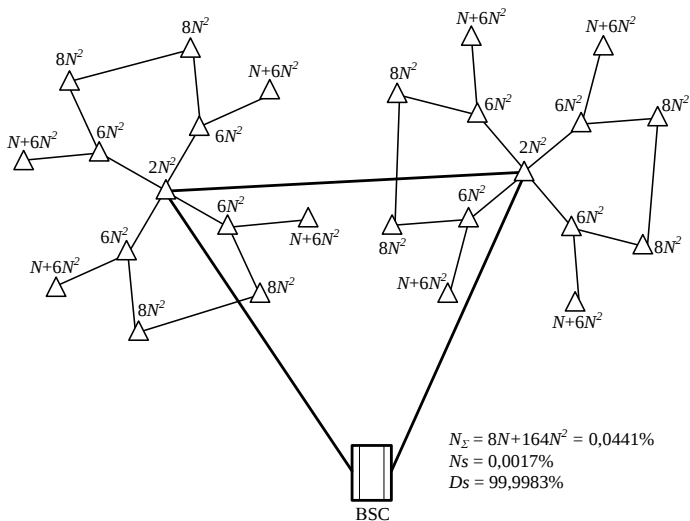


Рис. 2.11. Варіант 6 транспортної мережі

Був виконаний порівняльний аналіз варіантів топологій транспортних мереж. На рис. 2.6 представлена транспортна мережа, яка має «деревовидну» топологію. Це найдешевший варіант побудови мережі, але в даному випадку

відбувається накопичення ймовірності помилок і загального відсотка неготовності мережі. Окрім цього вузьким місцем топології є з'єднання з контролером радіомережі BSC. Тут зосереджується трафік від всіх попередніх BTS, що вимагає широкої смуги каналу зв'язку. Вихід з ладу устаткування на даній ділянці робить відразу недоступною велику частину мережі, що приводить до великих, у тому числі економічних, втрат для оператора. Для наведеної структури використовується 66 з'єднань для підключення 26 базових станцій. При цьому відсоток неготовності BTS складає 0,0127%.

Оптимізувати таку мережу можна застосувавши кільцеві з'єднання. На рис. 2.7-2.11 представлені різні варіанти топології з використанням кільцевих з'єднань. Для кожного з них розраховані показники неготовності (N) та готовності (D).

На рис. 2.7 розглядається вдосконалена структура транспортної мережі. Для підвищення коефіцієнта готовності використовуються з'єднання кільцем трьох BTS. При такій конфігурації сумарний коефіцієнт неготовності BTS дорівнює 0,00964%. Але звичайно вартість такої конфігурації мережі значно вища.

На рис. 2.8 представлено третій варіант конфігурації мережі, кільцем з'єднані основи дерев і BSC. При такій конфігурації сумарний коефіцієнт неготовності BTS дорівнює 0,0077%, який менше на 0,00194% у порівнянні з попередньою структурою, що складає 20%. Таким чином, з'єднання великої кількості BTS кільцем ефективніше, ніж об'єднання невеликих ділянок.

На рис. 2.9-2.11 представлені варіанти комбінованої конфігурації мережі. При комбінованій структурі досягається максимальне зниження коефіцієнта неготовності кожної BTS. Проте в мереж з такою топологією найвища вартість серед запропонованих варіантів. В той же час, варіант 6 дає найнижчий показник неготовності, не дивлячись на практично однакову вартість варіантів 4, 5 і 6.

Як бачимо, топологія з найнижчим коефіцієнтом неготовності має найвищу вартість, а топологія, що має найнижчу вартість, характеризується дуже високим коефіцієнтом неготовності. Таким чином, вказані показники якості транспортної мережі зв'язані між собою і є суперечливими. Конфігурація мережі залежить від середньої неготовності для кожної BTS і збалансованої вартості.

У результаті проведеного аналізу вказаних варіантів транспортної мережі можна зробити наступні висновки:

- використання кільцевих з'єднань (варіанти 2 – 6) значно зменшує коефіцієнт неготовності в порівнянні з використанням деревовидної топології (варіант 1);
- набагато ефективніше сполучати в кільце найбільш навантажені ланки (варіант 3), чим невелику кількість базових станцій на кінцях мережі (варіант 2);
- конфігурації 4 – 6 дають найбільші показники готовності, але при цьому мають найбільш високу вартість. При цьому при відносно рівній вартості варіант 6 має найнижчий показник неготовності.

Розглянуті варіанти побудови транспортної мережі представлені в критеріальному просторі показників якості: відносної вартості і коефіцієнта

неготовності (рис. 2.12). Вартість мережі розраховувалася згідно з необхідною кількістю з'єднань і наявністю крос-конекторів. Отримано, що варіанти топологій 1, 3, 6 – це негірші варіанти, які були включені в підмножину оптимальних по Парето варіантів топологій транспортної мережі. Інші варіанти топологій 2, 4, 5 є безумовно гіршими і були виключені з подальшого розгляду.

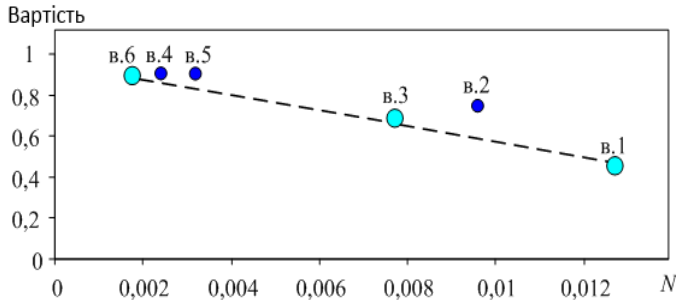


Рис. 2.12. Варіанти топології транспортної мережі у критеріальному просторі показників якості

Оптимальні по Парето варіанти топологій транспортної мережі є незрівняними між собою за безумовним критерієм переваги. Будь-який з Парето-оптимальних варіантів топології транспортної мережі може бути використаний для зв'язку базових станцій СМЗ з центром комутації. Для вибору єдиного переважного варіанту транспортної мережі з підмножини Парето-оптимальних також може бути використаний один з методів звуження підмножини Парето із залученням додаткової інформації від експертів.

2.5. Програма для вибору оптимальних проектних варіантів з урахуванням сукупності показників якості

Для вибору оптимальних проектних рішень на основі теорії багатокритеріальної оптимізації була розроблена програма МСО (Multi Criterial Optimization). Дана програмна реалізація виконує безпосередньо вибір оптимальних проектних варіантів з урахуванням сукупності показників якості на основі описаної вище методології багатокритеріальної оптимізації. Етапи і методи багатокритеріальної оптимізації, які були реалізовані у програмі МСО, наведені на рис. 2.13.

Програма вирішує наступні задачі:

- вибір і завдання значень показників якості для допустимих проектних варіантів,
- нормування і приведення показників якості до порівняльного вигляду,
- вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів
- з використанням методу дискретного вибору по безумовному критерію переваги Парето

- звуження множини Парето до єдиного проектного варіанту побудови мережі з використанням методу на основі функцій цінності або методу на основі лексикографічних стосунків.



Рис. 2.13. Етапи багатокритеріального вибору оптимальних проектних варіантів системи з урахуванням сукупності показників якості

Програма МСО реалізована на мові Java. Інтерфейс програми показаний на рис. 2.14. Для початку роботи програми необхідно задати множину допустимих варіантів, тобто сформувати таблицю, де рядки відповідають номерам варіантів системи, а стовпці $K_1 \dots K_{10}$ є параметрами системи, які можуть бути вибрані як показники якості системи.

Для формування таблиці необхідно вибрати кількість допустимих варіантів системи від 1 до 100 за допомогою градуйованої шкали (або вказати число у віконці праворуч від шкали). Кнопка *Create table* фіксує вказані кількість показників якості і число варіантів систем. Таким чином, створюється початковий шаблон для введення значень показників якості для допустимих варіантів системи.

Для кожного параметра K_n , який братиме участь в подальших обчисленнях, проставляються відмітки Enabled. Після цього слід задати, що необхідно виконувати для кожного вибраного показника якості (або мінімізувати, або максимізувати), для чого служать відмітки *min* та *max*. Після перевірки правильності введених даних і вибраних параметрів необхідно натиснути кнопку *Load*, при цьому введені дані фіксуються.

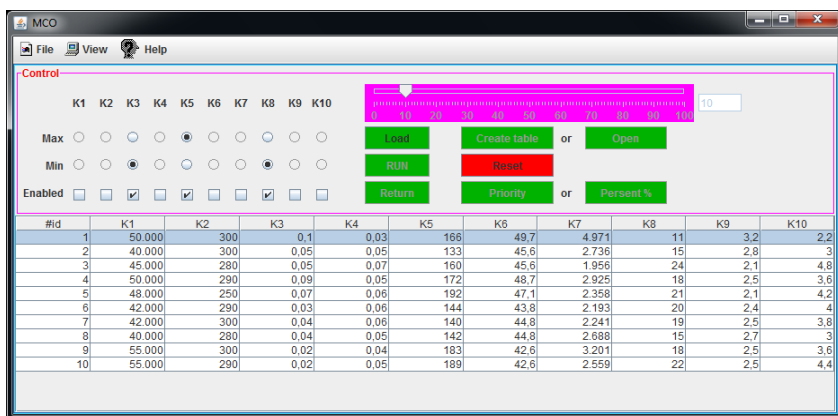


Рис. 2.14. Інтерфейс програми MCO для багатокритеріального вибору проектних варіантів

Для виконання Парето-оптимізації необхідно натиснути кнопку *Run*. При цьому значення оцінок показників якості нормуються і за допомогою методу дискретного вибору за безумовним критерієм переваги знаходиться підмножина Парето-оптимальних варіантів системи.

Звуження підмножини Парето до єдиного варіанту в програмі MCO може бути виконане одним з двох методів:

1. *Метод, заснований на лексикографічному підході.* Для вибору єдиного варіанту з підмножини Парето за допомогою цього методу необхідно натиснути кнопку *Priority* і задати пріоритети для кожного показника (від 1 до n , де n – кількість показників). Далі необхідно зафіксувати введені дані кнопкою *Load* (на панелі справа) та виконати вибір натиснувши кнопку *Run*. Отриманий єдиний (оптимальний) варіант підсвічує зеленим кольором.
2. *Метод, заснований на теорії корисності з використанням функцій цінності.* Для вибору єдиного варіанту з підмножини Парето за допомогою цього методу необхідно натиснути кнопку *Persent* і задати коефіцієнти важливості для кожного показника (від 1 до 100). Далі необхідно зафіксувати введені дані кнопкою *Load* (на панелі справа) і виконати вибір натиснувши кнопку *Run*. Отриманий єдиний (оптимальний) варіант підсвічує зеленим кольором.

Програма MCO також дозволяє зберегти набрані дані у файлі з розширенням *.mtm* – *mathTable Model* і відкрити при необхідності раніше збережені дані, щоб продовжити роботу з ними.

Висновки

1. Наведені результати вибору оптимальних проектних варіантів радіомережі СМЗ 2-го та 3-го покоління при їх номінальному проектуванні на

основі методів багатокритеріальної оптимізації. Отримані багатовимірні потенційні характеристики та багатовимірні діаграми обміну вибраних показників якості СМЗ.

2. Розглянуто особливості багатокритеріального аналізу та методів вибору опти-мальных топологій транспортної мережі СМЗ з урахуванням сукупності показників відносної вартості та неготовності мережі.

3. Отримано практичні рекомендації по використанню методів багатокритеріальної оптимізації на номінальному етапі планування радіомережі та транспортної мережі СМЗ.

Література

1. Mishra A.R. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation. 2G/2.5G/3G Evolution TO 4G /Edited by Ajay R. Mishra. – UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007. -542 p.
2. Wiley Jn. Next Generation Mobile Systems 3G and Beyond /Edited by Minoru Etoh.–UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 406 p.
3. Закиров З.Г. Сотовая связь стандарт GSM. Современное состояние, переход к сетям третьего поколения / З.Г. Закиров, А.Ф. Надеев, Р.Р. Файзуллин. – М.: Эко-Трендз, 2004. – 264 с.
4. Bezruk V.M., Bukhanko A.N., Chebotareva D.V., Varich V.V. Multicriteria optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling // Open Book “Telecommunications Networks”. Chapter 11. – Rijeka: INTECH, 2012. - P. 251 – 274.
5. Чеботарёва Д.В., Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи. – Х. : Компания СМИТ, 2013. – 148 с.
6. Безрук В.М., Чеботарева Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. – Харьков: СМИТ, 2017. – 256 с.