

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)  
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського  
(повна назва)

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження багатокритеріального підходу до вибору параметрів елементів  
інфокомунікаційної мережі  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи TСМм-18-1

Бухаров О.С.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми: освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма: Телекомунікаційні системи  
та мережі  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент кафедри ІКІ ім. В.В. Поповського

Мельнікова Л.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Лемешко О.В.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)  
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма Телекомунікаційні системи та мережі  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Бухарову Олексію Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. «Тема роботи: Дослідження багатокритеріального підходу до вибору параметрів елементів інфокомунікаційної мережі»  
затверджена наказом по університету від «11» березня 2020р. № 437-Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 21.05.2020 р.
3. Вихідні дані до роботи: Кодеки та їх параметри: G711 ( Ie = 0, Bpl = 4.3, Idte = 0, Idle = 0), G 726 ( Ie = 7, Bpl = 24, Idte = 0, Idle = 0), G 729 ( Ie = 10, Bpl = 18, Idte = 0, Idle = 0), G 723.1 ( Ie = 15, Bpl = 20, Idte = 0, Idle = 0), G 728 ( Ie = 7, Bpl = 27, Idte = 0, Idle = 0), дані експертів.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
  - 1) Аналіз особливостей оптимізаційних задач в телекомунікаціях
  - 2) Математичні основи рішення задач багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень
  - 3) Застосування процедури багатокритеріальної оптимізації з урахуванням інформації експертів до вирішення деяких завдань оптимізації в телекомунікаціях.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, плакатів): Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації. Особливості оптимізації в ТКС; Математична постановка задачі БГО; Характеристики кодеків;

Е-модель; Графіки залежностей R-фактора від  $T_a$  и  $P_{pl}$ ; Вхідні дані для розрахунку БГО; Результати вирішення задачі маршрутизації; Висновки; Перелік опублікованих робіт.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

| Найменування розділу | Консультант<br>(посада, прізвище, ім'я, по-батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу |        |
|----------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------|
|                      |                                                      | (підпис)                                    | (дата) |
| Основна частина      | доцент<br>Мельнікова Л.І.                            |                                             |        |

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи             | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1 | Отримання завдання              | 13.03.2020                     | Виконано |
| 2 | Збір матеріалів для дослідження | 19.03.2020                     | Виконано |
| 3 | Розробка 1 розділу              | 21.03.2020                     | Виконано |
| 4 | Розробка 2 розділу              | 30.03.2020                     | Виконано |
| 5 | Розробка 3 розділу              | 18.04.2020                     | Виконано |
| 7 | Оформлення атестаційної роботи  | 02.05.2020                     | Виконано |

Дата видачі завдання 01 лютого 2020 р.

Студент \_\_\_\_\_ Бухаров О.С. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доцент Мельнікова Л.І. \_\_\_\_\_  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 15 рис., 5 табл., 3 додатки, 20 джерел.

У роботі розглянуті особливості оптимізаційних задач в телекомунікаціях. За допомогою Е-моделі було отримано залежності якості передачі голосового трафіку від таких параметрів телекомунікаційної мережі, як ймовірність відкидання пакету та абсолютної затримки. З використанням методу багатокритеріальної оптимізації проведено вибір кодека. Застосування алгоритму багатокошляхової маршрутизації дозволяє визначити оптимальне число незалежних найкоротших шляхів, що дає можливість оптимізувати використання ресурсів в проєктованих мережах зв'язку.

Об'єкт дослідження – дослідження багатокритеріального підходу до вибору параметрів елементів інфокомунікаційної мережі.

Предмет дослідження – багатокритеріальна модель проєктування мереж.

Мета роботи – дослідити багатокритеріальний підхід до вибору параметрів елементів при проєктуванні інфокомунікаційних мереж.

Методи досліджень – системний аналіз, Е-модель, оптимізаційні методи, імітаційне моделювання.

**Р-ФАКТОР, ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ, ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ, КОДЕК, МЕТОД КОДУВАННЯ, БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, НАЙКОРОТШИЙ ШЛЯХ.**

## ABSTRACT

Explanatory note: 71 s, 15 figures, 5 tables, 3 application, 20 sources.

The peculiarities of optimization problems in telecommunications are explained in the work. With the help of the E-model, the dependences of the quality of voice traffic transmission on such parameters of the telecommunication network as the probability of packet rejection and absolute delay were obtained. The codec was selected using the method of multicriteria optimization. The multi-path routing algorithm allows you to determine the optimal number of independent shortest paths, which allows you to optimize the use of resources in the designed communication networks.

The object of research is the optimal definition of the problem of multicriteria approach to network design.

The subject of research is a multicriteria model of network design.

The purpose of the work is to investigate a multicriteria approach to the choice of parameters of elements in the design of infocommunication networks.

Research methods - systems analysis, E-model, optimization methods, simulation modeling.

R-FACTOR, NETWORK DESIGN, QUALITY OF SERVICE, CODE, CODING METHOD, MULTICRITERIAL OPTIMIZATION, PERFORMANCE, PERFORMANCE.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів.....                                                                                      | 8  |
| Вступ.....                                                                                                                                                   | 9  |
| 1 Аналіз особливостей оптимізаційних задач в телекомунікаціях.....                                                                                           | 11 |
| 1.1 Оптимізація системи передачі інформації з урахуванням показників енергетичної та частотної ефективності .....                                            | 11 |
| 1.2 Оптимізація мережі зв'язку за сукупністю показників середнього часу затримки і вартості.....                                                             | 16 |
| 1.3 Вибір оптимальних проектних варіантів мережі передачі даних з урахуванням сукупності показників якості .....                                             | 24 |
| 1.4 Особливості оптимізаційних задач в телекомунікаціях .....                                                                                                | 26 |
| 2 Математичні основи рішення задач багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень.....                                                             | 31 |
| 2.1 Загальні відомості з теорії багатокритеріальної оптимізації.....                                                                                         | 31 |
| 2.2 Метод вагових множників.....                                                                                                                             | 33 |
| 2.3 Метод епсилон обмежень .....                                                                                                                             | 34 |
| 2.4 Метод справедливого компромісу .....                                                                                                                     | 35 |
| 2.5 Метод наближення до ідеального рішення .....                                                                                                             | 36 |
| 2.6 Евристична процедура вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації .....                                                                              | 38 |
| 3 Застосування процедури багатокритеріальної оптимізації з урахуванням інформації експертів до вирішення деяких завдань оптимізації в телекомунікаціях ..... | 41 |
| 3.1 Багатокритеріальний вибір оптимальних варіантів мовних кодеків .....                                                                                     | 41 |
| 3.1.1 Вибір і визначення основних параметрів кодеків, що впливають на якість передачі мови в IP-телефонії.....                                               | 41 |
| 3.1.2 Вибір кращого варіанту кодека за допомогою евристичної процедури багатокритеріальної оптимізації .....                                                 | 55 |
| 3.2 Вибір оптимальних маршрутів у мультисервісних мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості .....                                           | 58 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Висновки.....                                                               | 69 |
| Перелік джерел посилань.....                                                | 70 |
| Додаток А Текст програми.....                                               | 72 |
| Додаток Б Протокол діалогу ЛПР .....                                        | 73 |
| Додаток В Схема алгоритму програми багатокритеріальної оптимізації<br>..... | 74 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,  
ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

КЗ — канал зв'язку

ЛПР — лице приймаюче рішення

СПП — системи передачі

ADPCM – adaptive differential pulse-code modulation

IP – internet protocol

LD-CELP – low delay - code excited liner prediction

LPC – linear predicative coding

MOS – mean opinion score

MP-MLQ – mylty pulsy – mylty level quantization

QDU – quantization distortion units

QoS – quality of service

DSP – directory service provider

MIPS – million instructions per second

TCP – transmission circuit protocol

ETSI – the european telecommunication standards institute

MPLS- TE — multiprotocol label switching

NTP — network time protocol

## ВСТУП

Засоби телекомунікацій - це сукупність технічних пристроїв, алгоритмів і програмного забезпечення, що дозволяють передавати і приймати мову, мультимедійну інформацію та інші дані за допомогою електричних і електромагнітних коливань по кабельних, волоконно-оптичним і радіоканалах у різних діапазонах хвиль [1]. Це пристрої перетворення і обробки інформації, кодування і декодування, модуляції і демодуляції, телекомунікаційні технології передачі інформації, пристрої розподілу і маршрутизації в мережах зв'язку та ін. Засоби телекомунікацій є важливими компонентами сучасних систем і мереж інфокомунікацій. Тому при проектуванні систем інфокомунікацій виникає необхідність вибору кращого варіанту з деякого допустимого множини варіантів засобів телекомунікацій з урахуванням сукупності суперечливих техніко-економічних вимог, які характеризуються значеннями відповідних показників якості. Це визначає необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації при виборі бажаних рішень з множини допустимих проектних варіантів засобів телекомунікацій.

В даний час методи багатокритеріальної оптимізації ще недостатньо широко застосовуються при виборі оптимальних проектних варіантів пристроїв, систем і мереж зв'язку з урахуванням сукупності показників якості [2]. Тому вважається корисним розглянути особливості методів багатокритеріальної оптимізації та навести приклади їх застосування при виборі бажаних проектних варіантів для різних типів засобів телекомунікацій з урахуванням сукупностей показників якості.

У атестаційній роботі проаналізовано особливості використання методів багатокритеріальної оптимізації при проектуванні оптимальних систем з урахуванням сукупності показників якості. Показано, що рішення багатокритеріальних оптимізаційних задач зводиться до знаходження оптимальних щодо безумовного критерію переваги (критерієм Парето) проектних рішень, які є високими порівняно між собою. Для подальшого вибору єдиного кращого варіанту системи з підмножини Парето вводиться деякий умовний критерій переваги із залученням додаткової суб'єктивної інформації від експертів.

У роботі викладається методологія багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень з урахуванням сукупності суперечливих показників якості. Ця методологія являє собою взаємопов'язану сукупність формалізованих методів і процедур завдання критерію оптимальності проектованої системи, формування вихідного множини проектних рішень, знаходження підмножини Парето-оптимальних рішень, а також звуження цього підмножини до єдиного кращого проектного варіанту системи із залученням додаткової інформації від експертів.

# 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

## 1.1 Оптимізація системи передачі інформації з урахуванням показників енергетичної та частотної ефективності

Відомо рішення задачі оптимізації пропускної здатності системи передачі (СП) безперервних повідомлень, яке було отримано К. Шенноном [3]. Вважалося, що структура СП задана в найзагальнішому вигляді, тобто вона складається з кодера, каналу зв'язку та декодера. Вважається, що інформаційний сигнал  $x(t)$  описується стаціонарним випадковим процесом з щільністю ймовірності  $W(x)$ . Інформаційний сигнал передається по безперервному каналу зв'язку і має середню потужність  $P_c$  і ширину спектра, який збігається з пропускною здатністю каналу зв'язку  $\Delta f$ . Сигнал  $x(t)$  представляється відповідно до теореми Котельникова дискретними відліками  $x(i\Delta t)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ , взятими в дискретні моменти часу через інтервал  $\Delta t = \frac{1}{2\Delta f}$ . При цьому передача інформаційного сигналу по каналу зв'язку розглядається як передача незалежних відліків  $x(i\Delta t)$  зі швидкістю ( $V_k = \frac{1}{\Delta t} = 2\Delta f$ ).

У каналі зв'язку діє адитивна флуктуаційна перешкода у вигляді гауссовського білого шуму з спектральною щільністю  $N_0$ .

К. Шеннон ставив завдання оптимізувати пропускну здатність СП  $C$  при варіаціях щодо довільних видів інформаційного сигналу, тобто щодо всіх можливих видів щільності ймовірності  $W(x)$ . Оптимізація проводилася для одного показника якості - пропускної здатності системи  $\Delta f, P_c, N_0$ , розглядалися як фіксовані, але довільні параметри системи. При цьому було отримано співвідношення для потенційної швидкості передачі - пропускної здатності системи у вигляді:

$$C = \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{N_0 \Delta f} \right). \quad (1.1)$$

Розглянемо рішення цієї задачі з точки зору багатокритеріального підходу при обліку сукупності показників якості. Будемо характеризувати СП сукупністю

показників якості, визначених через технічні параметри системи, зокрема, у вигляді  $k_1 = \frac{1}{C}$ ,  $k_2 = \Delta f$ ,  $k_3 = P_c$ ,  $k_4 = 1/N_0$ . Це показники якості, пов'язані відповідно з пропускнуою спроможністю витратами смуги частот, потужністю сигналу і завадостійкістю СПІ. Неважко бачити, що введені показники якості пов'язані між собою і мають конкуруючий характер. Тому оптимізація СПІ за сукупністю показників якості може бути виконана методами багатокритеріальної оптимізації веде до Парето-оптимальних рішень, яким відповідає узгоджений оптимум показників якості.

Для вирішення такого завдання багатокритеріальної оптимізації може бути використаний метод робочих характеристик, який зводиться до оптимізації одного з показників якості СПІ при фіксованих, але довільних значеннях інших показників якості. Неважко показати, що використання цього методу призводить до. Рішенням багатокритеріальної оптимізаційної задачі, яке з точністю до позначень збігається з рішенням, отриманим К. Шенноном. Це співвідношення фактично визначає багатовимірні потенційні характеристики СПІ в вигляді

$$k_1 = 1/k_2 \log_2(1 + \frac{k_3 k_4}{k_2}). \quad (1.2)$$

Оскільки у формулі (1.2) залежно по кожному показнику якості монотонно спадають, то це підтверджує, що отримана робоча поверхня збігається з Парето-оптимальної поверхнею і вона відповідає Парето-оптимальних рішень.

Таким чином К. Шеннон, відшукуючи потенційне значення швидкості передачі інформаційних сигналів, тобто пропускну здатності СПІ, в загальному вигляді (1.1) при довільних значеннях параметрів  $\Delta f, P_c, N_0$  фактично отримав Парето-оптимальні рішення багатокритеріальної оптимізації СПІ. Багатовимірні діаграми обміну показників якості (1.2) дають можливість проаналізувати, які з потенційних значень можна досягти для зв'язаних і конкуруючих між собою показників якості, а також показують, яким чином виконати «обмін» потенціальних значень одних показників якості на значення інших показників якості СПІ.

Отримана діаграма обміну показників якості є чотиривимірною і в загальному випадку незручна для аналізу та інтерпретації. Тому виникає необхідність скорочення її розмірності. На практиці часто використовують діаграму обміну у вигляді двовимірної залежності показників. Скорочення розмірності чотиривимірної

діаграми обміну виконують, вводючи узагальнені показники якості, зокрема, такі, як питомі витрати середньої потужності сигналу  $\beta_E = \frac{P_c}{N_0 C} = k_1 k_3 k_4$ , а також смуги пропускання  $\beta_{\Delta f} = \frac{\Delta f}{C} = k_1 k_2$ . Ці узагальнені показники якості називають показниками енергетичної і частотної ефективності СП.

$$\beta_E = \beta_{\Delta f} (\exp[(\ln 2)/\beta_{\Delta f}] - 1). \quad (1.3)$$

Ця двовимірна діаграма обміну широко використовується для аналізу потенційних можливостей СП і називається кривою граничної ефективності Шеннона, при якій досягається певне значення інформаційної ефективності  $\beta_R = \frac{R}{C} = 1$ . Ця діаграма обміну приведена на рисунку 1.1а.

Слід зауважити, що в розглянутій задачі оптимізації СП прийнятий ряд ідеалізацій, які привели до потенційних характеристикам, які не можуть бути досягнуті в реальних системах. Найбільш важливими ідеалізаціями були такі. Чи не враховувалося дію будь-яких інших джерел похибок крім перешкоди у вигляді гауссовського білого шуму. Покладалася також можливість кодування повідомлень навіть при значній затримці повідомлень. Це забезпечувало як завгодно малу похибку сигналів  $\delta^2$  при довільних кінцевих значеннях пропускної спроможності  $C$  і спектральної щільності потужності перешкоди  $N_0$ . Тому при вирішенні цієї оптимізаційної задачі не враховувалася похибка передачі інформаційного сигналу.

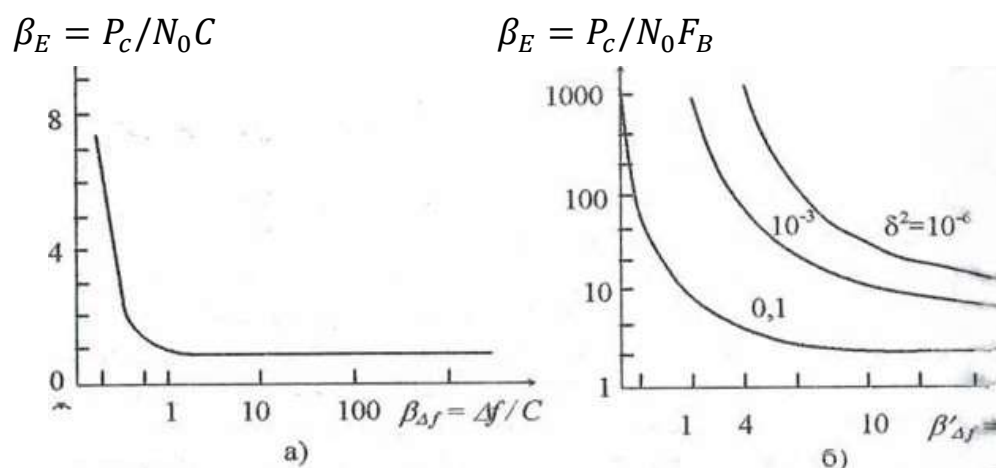


Рисунок 1.1 — Діаграми обміну показників енергетичної та частотної ефективності системи передачі безперервних повідомлень

Аналогічно, як і в попередньому випадку, була вирішена з оптимізації системи СП з додатковим урахуванням також і показника похибки передачі 82 безперервних повідомлень  $x(t)$ . Отримані діаграми обміну у вигляді сімейства залежностей показників генетичної і частотної ефективності СП при деяких значеннях 82 зображені на рис. 1.16.

Розглянемо ще одну задачу оптимізації системи передачі дискретних повідомлень, в якій здійснюється блочне кодування повідомлень ортогональними сигналами. При цьому передані повідомлення являють собою послідовність незалежних двійкових символів. У кодері накопичується блок з таких символів, який передається одним з  $M = 2^m$  ортогональних сигналів  $s_i(t), i = \overline{1, M}$ . Прийом закодованих таким чином повідомлень виконується по блоках - протягом кожного інтервалу часу  $T = mT_c$  передачі блоку з  $m$  двійкових символів тривалістю  $T_c$ . У приймальнику приймається рішення про те, як з  $M$  ортогональних сигналів був переданий. Вважається, що ортогональні сигнали мають однакову енергію  $E$ , а в каналах зв'язку діє перешкода типу гауссовський білий шум зі спектральною щільністю потужності  $N_0$ .

При цьому досягається максимальна швидкість передачі  $M$  ортогональних сигналів (тобто пропускна здатність СП), яка визначається співвідношенням

$$C = \left[ \left( \frac{P_A}{N_0} \right) / \ln 2 \right] \left[ 1 + \log_2 \left( \frac{1}{P_{>H}} \right) / \log_2 M \right]. \quad (1.4)$$

Співвідношення (1.4) пов'язує між собою стандартні для системи зв'язку показники якості передачі дискретних повідомлень

$$k_1 = P_{\text{ощ}}, k_2 = 1, k_3 = 1/C. \quad (1.5)$$

Ці показники якості можна розглядати як показники точності, завадостійкості в пропускної здатності СП.

Співвідношення (1.4) було отримано шляхом оптимізації СП, яка забезпечує мінімальне значення ймовірності помилки передачі бітових сигналів  $k_1 = P_{\text{ощ}}$  при фіксованих, але довільних значень  $k_2, k_3$ . З урахуванням (1.5) співвідношення (1.4) представляється у вигляді

$$\frac{1}{k_3} = [(P_c k_2 / \ln 2) \left[ 1 + \log_2 \left( \frac{1}{k_{1min}} \right) / \log_2 M \right]]. \quad (1.6)$$

Аналізуючи це співвідношення неважко переконатися, що залежності між показниками якості є монотонно спадаючі. Тому співвідношення (1.6) являє собою багатовимірні потенційні характеристики і багатовимірні діаграми обміну введених показників якості такої СПІ.

Аналогічно можна розглянути з багатокритеріальних позицій відому задачу оптимізації точності передачі безперервних повідомлень на інтервалі часу  $T$  в СПІ з гауссовським білим шумом, яка була вирішена В.А. Котельниковим. При цьому можна ввести сукупність показників якості, що характеризують відповідно точність, стійкість і швидкість передачі безперервних повідомлень.

$$k_1 = \delta^2, k_2 = 1/N_0, k_3 = 1/T. \quad (1.7)$$

Фактично В. А. Котельников вирішував завдання мінімізації показника якості  $k_1 = \delta^2$  при фіксованих, але довільних значеннях двох інших показників  $k_2 = 1/N_0, k_3 = 1/T$ . А це відповідно до методу робочих характеристик дає Парето-оптимальні рішення зазначеної оптимізаційної задачі і багатовимірні діаграми обміну введених показників якості (1.6).

Відомо також рішення задачі оптимізації симплексної системи зв'язку з урахуванням сукупності показників якості. Вважалося, що система складається з кодера (пристрої формування сигналів), передавача, передаючої антени, каналу зв'язку з адитивним флуктуаційним шумом, прийомної антени, вхідний високочастотної частини приймача, пристрою обробки сигналів (декодера).

В системі зв'язку передбачено поелементне резервування причому час життя кожного елемента підпорядковується експоненціальним законом розподілу. Система зв'язку характеризується такою сукупністю показників якості:  $k_1$  - величина, зворотна швидкості передачі,  $k_2$  - вартість системи,  $k_3$  - апаратна ненадійність системи,  $k_4$  - стійкість системи.

У цій багатокритеріальній оптимізаційній задачі мінімізували показник  $k_1$  при фіксованих, але довільних значеннях інших показників якості. Шляхом параметричної оптимізації з обмеженнями типу рівностей методами геометричного програмування знайдена Парето-оптимальна поверхня, що визначає взаємозв'язок потенційних значень виведених показників якості.

У розглянутих вище оптимізаційних задачах, а також і при вирішенні багатьох інших завдань оптимізації СПП в явній і прихованій формі враховується не один, а деяка сукупність пов'язаних між собою і антагоністичних показників якості. Таким чином, в загальному випадку практично всі оптимізаційні завдання в галузі зв'язку є багатокритеріальні по суті. Ігнорування інших показників якості, крім одного (найбільш важливого), при оптимізації СПП неприпустимий. Це пов'язано з тим, що при цьому завдання оптимізації СПП вироджується в тривіальну і показник якості який оптимізується досягається нуля. Тому багато класичних задач оптимізації в галузі зв'язку, які вирішені як завдання скалярної оптимізації, можна розглядати з позицій багатокритеріальної оптимізації. Це дає можливість інакше подивитися на результати вирішення задачі оптимізації, отримати і проаналізувати багатовимірні потенційні характеристики, а також багатовимірні діаграми обміну показників якості і зробити відповідні висновки про шляхи підвищення ефективності відповідних СПП.

## 1.2 Оптимізація мережі зв'язку за сукупністю показників середнього часу затримки і вартості

Мережі зв'язку являють собою сукупність кінцевих вузлів і вузлів комутації, а також каналів (ліній) зв'язку (КЗ) які з'єднують їх між собою. Це більш складні системи зв'язку, в яких в якості ліній зв'язку фактично використовуються одноканальні або багатоканальні системи передачі інформації. У мережах зв'язку поряд з процесами передачі інформації в КЗ мають місце процеси розподілу інформації, які проходять в вузлах комутації [4]. Тому в мережах зв'язку поряд з показниками якості, характеризують процеси передачі інформації, слід враховувати показники, які характеризують процеси розподілу інформації. Це показники якості, пов'язані з затримкою і втратою повідомлень, помилками при доставці повідомлень конкретним адресатам та ін.

Розглянемо відому задачу мінімізації середнього часу затримки в мережі зв'язку з комутацією повідомлень і фіксованою процедурою вибору маршрутів, який виникає при проектуванні мереж зв'язку [5]. Тут наведено рішення задачі багатокритеріальної оптимізації з двома показниками якості у вигляді середнього часу затримки повідомлень в мережі і вартості орендної оплати за користування мережею. Мінімізували один з показників якості (середній час затримки

повідомлень в мережі) за умови, що другий показник (орендна плата) переведений в розряд обмежень, тобто брав фіксоване значення. Рішення такої оптимізаційної задачі досягалося шляхом вибору оптимальних пропускних спроможностей каналів зв'язку.

Зупинимося на основних етапах вирішення цього завдання. Відсоток передачі повідомлень в мережі зв'язку породжує систему випадкових (в часі і в просторі) потоків даних. Вважається, що якість функціонування мережі зв'язку визначається в першу чергу середнім часом затримки повідомлень, яке характеризується проміжком часу від моменту підключення відправника до моменту видачі повідомлення даних одержувачу. Повідомлення виникають в випадкові моменти часу, а їх тривало часу є випадковими величинами. Для передачі повідомлень в мережі зв'язку використовуються КЗ з певними пропуск здібностями, значення яких впливає на час затримки повідомлень в мережі. В якості критерію оптимальності мережі вибирається мінімум середнього часу затримки повідомлень заданих обмеженнях на вартість мережі (орендну плату за користування мережею).

Розглянемо математичну модель мережі зв'язку з точки з її використання при вирішенні зазначеної оптимізаційної задачі. Модель мережі зв'язку з комутацією повідомлень має  $V$  каналів зв'язку (КЗ) і  $W$  вузлів комутації (ВК). Вважається, що в КЗ немає помилок і апаратні відмови, а пропускна здатність  $i$ -го дорівнює  $c_1$  (біт/с). Тривалість обробки повідомлень всіх ВК є постійною і дорівнює  $t_{обр}$ . Як правило, величина  $t_{обр}$  є значно меншою по відношенню до тривалості передачі повідомлень по КЗ.

З точки зору математичної моделі масового обслуговування кожен КЗ розглядається як обслуговуючий прилад і може мати чергу заявок на обслуговування (передачу повідомлень), через що можливі затримки при передачі повідомлень від відправника до одержувача мережі. Вважається, що трафік, який надходить від джерел повідомлень, утворює пуассоновський потік із середнім значенням  $\gamma_{ik}$ . Це кількість повідомлень за секунду, які виникають в ВК  $w_k$  і призначені для передачі в ВК  $w$ . Повний зовнішній трафік, який надходить в мережу, визначається відношенням  $\gamma = \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^W \gamma_{ik}$ .

Довжини повідомлень є незалежними величинами і розподілені по показовому закону із середнім значенням  $1/x$  біт. Для розміщення цих повідомлень в ВК є буферна пам'ять необмеженого обсягу. Вважається, що обсяг буферної

пам'яті настільки великий, що ймовірність одночасного звернення різних користувачів до цього ресурсу менше ніж  $10^{-3}$  і це припущення про необмежену обсязі буферної пам'яті є цілком прийнятним. Повідомлення надсилаються через мережу вузла-джерела до вузла-одержувача відповідно до фіксованою процедурою вибору маршрутів.

Якщо повідомлення має довжину  $n$  біт, то час, протягом якого воно займає  $i$ -й КЗ, буде  $n/c_i$ . Якщо позначити через  $\varphi_i$  середнє число повідомлень в секунду, які проходять по  $i$ -му каналу, тоді повний внутрішній трафік в мережі визначається співвідношенням  $\varphi = \sum_{i=1}^V \varphi_i$ .

Вартість оренди  $i$ -го КЗ з пропускною спроможністю  $c_i$  задається деякою функцією  $d_i(c_i)$ , яка залежить від номера і пропускної здатності КЗ. Позначимо через  $D$  вартість всієї мережі зв'язку, яка визначається в основному вартістю побудови (або оренди) КЗ. При цьому вартість ВК можна включити безпосередньо в вартість каналів. Тоді вартість всієї мережі дорівнює

$$D = \sum_{i=1}^V d_i(c_i) . \quad (1.8)$$

Найбільший інтерес становить середній час затримки повідомлень в мережі  $\bar{T}$ , яке вважається користувачем однієї з основних характеристик мережі зв'язку. Позначимо через  $\bar{Z}_{jk}$  величину затримки повідомлення яка виникла в ВК  $w_j$  і передається в ВК  $w_k$ . Тоді величини  $\bar{T}$  і  $\bar{Z}_{jk}$  пов'язані співвідношенням

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^W \sum_{k=1}^W \left( \frac{\gamma_{jk}}{\gamma} \right) \bar{Z}_{jk}, \quad (1.9)$$

де  $\gamma_{jk}/\gamma$  — частина повного вхідного трафіку, яка має затримку  $\bar{Z}_{jk}$ . Вираз відображає розкладання мережі по парам «джерело-одержувач».

Визначимо критерій якості мережі зв'язку — середній час затримки повідомлень  $\bar{T}$  в мережі — і будемо мінімізувати його значення за рахунок відповідного вибору оптимальних значень пропускних спроможностей КЗ при обліку обмежень на вартість мереж типу рівності (1.8).

Таким чином, в цій оптимізаційній задачі розглядається основна технічна характеристика мережі зв'язку — середній час затримки повідомлень  $\bar{T}$  і

обмеження на вартість мережі, а також топологія і параметри мережі —  $\{c_j\}$ ,  $\{\varphi_l\}$ . При цьому змінними параметрами є пропускні спроможності каналу зв'язку.

Розглянемо середній час затримки  $\bar{T}$ , яке визначається співвідношенням (1.9), для з'ясування природи його випадкового характеру. Позначимо через  $l_{jk}$  шлях, по якому передається повідомлення від ВК  $w_i$  до ВК  $w_k$ . Вважається, що трафік  $\gamma_{ik}$  для  $i$ -го КЗ з пропускною спроможністю  $c_i$  включений в шлях  $l_{jk}$ , якщо повідомлення, переда цим шляхом, проходять через вказаний КЗ. У такому випадку інтенсивність потоку заявок  $\varphi_i$  по  $i$ -му КЗ повинна дорівнювати сумі інтенсивностей потоків заявок по всіх шляхах, які проходять через цей КЗ

$$\varphi_i = \sum_j \sum_k \gamma_{jk} . \quad (1.10)$$

Оскільки  $\bar{Z}_{jk}$  являє собою суму середніх часів затримок, які отримало повідомлення при його передачі за різними КЗ шляху  $l_{jk}$ , то

$$\bar{Z}_{jk} = \sum_{i: c \in l_{jk}} \bar{T}_i . \quad (1.11)$$

Тут  $\bar{T}_i$  — середній час, проведений повідомленням в  $i$ -му КЗ, тобто середній час затримки. Воно визначається як час, витрачений на очікування і передачу по  $i$ -му КЗ.

З урахуванням (1.9), (1.10) виходить наступний вираз для середнього часу затримки

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^V \left( \frac{\gamma_i}{\gamma} \right) \bar{T}_i . \quad (1.12)$$

До цього ж результату можна прийти також, скориставшись формулою Літла. Дійсно середнє число повідомлень які очікують обслуговування в  $i$ -му КЗ, так само  $\varphi_i \bar{T}_i$ . Тоді середнє число повідомлень в мережі буде  $\sum_{i=1}^V \varphi_i \bar{T}_i$ . З іншого боку, середнє число повідомлень в мережі дорівнює  $\gamma \bar{T}$ . Прирівнюючи ці величини  $\gamma \bar{T} = \sum_{i=1}^V \varphi_i \bar{T}_i$ , отримуємо

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^V \varphi_i \bar{T}_i . \quad (1.13)$$

Висловимо середній час, проведений повідомленням в мережі, через характеристики КЗ. У розглянутій моделі мережі зв'язку інтервали між моментами надходження повідомлень залежать від часу обслуговування в КЗ. Це означає, що час обслуговування для іншого повідомлення в різних КЗ пов'язане з довжиною повідомлення  $n$  і фіксованими параметрами каналів: довжиною  $l_{jk}$  і часом поширення сигналу в КЗ  $t_j$ . Якщо  $v$  - швидкість поширення енергії сигналу однієї бітової посилки повідомлення в каналі то  $t_j = l_{ij}/v$ . Якщо повідомлення складається з  $p$  бітових символів, то час, протягом якого воно займає  $i$ -й КЗ, буде визначатися сумою  $t_j + n/c_j$ . Враховувати значення  $t_j$  слід для мережі зв'язку, яка має велику географічну довжину. Вважається, що КЗ не вносять помилок і є надійними.

Для мережі з середньою зв'язністю ВК мають більш ніж один вхідний канал і більш ніж один вихідний канал. Використовуючи припущення про незалежність КЗ, окремий КЗ можна представляти у вигляді однолінійної системи масового обслуговування з пуассоновским потоком  $\varphi_i$  на вході і експоненціальним часом обслуговування із середнім значенням  $1/\mu c_i$ . Для такої системи середній час затримки, який зумовлений деяким часом очікування і часом, представляється у вигляді  $\bar{T}_i = \frac{n_c}{\mu c_i} + 1/(\mu c_i)$ .

Використовуючи вираз для середнього числа повідомлень, які очікують обслуговування в  $i$ -м КЗ  $n_c = \varphi_i \bar{T}_i$ , і виконуючи відповідні перетворення, отримуємо вираз для середнього часу затримки в  $i$ -м КЗ

$$\bar{T}_i = 1/(\mu c_i - \varphi_i) . \quad (1.14)$$

Підставивши цей вираз в (1.13), остаточно отримуємо відношення для середнього часу затримки повідомлень в мережі зв'язку

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^V \left( \frac{\varphi_i}{\gamma} \right) [1/(\mu c_i - \varphi_i)] . \quad (1.15)$$

Аналізуючи вираз (1.15), можна зробити деякі висновки щодо середнього часу затримки повідомлень в мережі У тому випадку, коли множина пропускних спроможностей КЗ щодо однорідне, при збільшенні навантаження на мережу ніяке доданок у виразі для середнього часу затримки повідомлення в мережі не буде

домінуючим до тих пір, поки потік повідомлень в одному з КЗ (наприклад, в  $i$ -му) не досягне пропускної здатності цього КЗ. Цей КЗ стає «вузьким» місцем в мережі і тоді значення  $\bar{T}$ , швидко зростає.

Після виконаного аналізу причин затримки повідомлень передачі через мережу можна перейти до розгляду завдання мінімізації  $\bar{T}$  шляхом вибору відповідних оптимальних пропускних спроможностей КЗ  $\{c_i\}$ .

Завдання вибору оптимальних пропускних спроможностей КЗ в мережі зв'язку формулюється в такий спосіб. Задані потоки і топологія мережі. Потрібно мінімізувати  $\bar{T}$  за рахунок варіацій  $\{c_i\}$  при обліку обмеження (1.8). Будемо розглядати випадок лінійних вартісних функцій щодо пропускних спроможностей КЗ

$$d_i(c_i) = d_i c_i, \quad (1.16)$$

де  $d_i$  — вартість одиниці пропускної здатності для  $i$ -го КЗ.

Вартісний коефіцієнт  $d_i$  може довільно змінювати в залежності від якогось параметра КЗ, але він повинен лінійно залежати від пропускної здатності. Наприклад,  $d_i$  часто беруть пропорційним фізичної довжині каналу. Таким чином у разі лінійної залежності збереження загальної вартості на фіксованому рівні буде еквівалентною підтримки загальної пропускної здатності мережі на деякому постійному рівні.

З виразу (1.15) випливає, що будь-який реалізовується рішення задачі ВПС має бути таким, щоб виконувалася умова:  $i$ -й КЗ повинен мати пропускну здатність  $c_i > \varphi_i/\mu$ . З точки зору затримки повідомлень в мережі зв'язку несуттєво, яким чином розподіляється надлишкова вартість щодо вхідного трафіку і пропускної здатності КЗ.

При заданому вигляді функціоналу для основного показника якості мережі зв'язку можна відшукати його мінімальне значення при введенні обмежень на інший показник якості (1.8). Для вирішення такої двокритеріальної оптимізаційної задачі можна використовувати метод невизначених множників Лагранжа. При цьому складається функціонал Лагранжа  $G = \bar{T} + \beta [\sum_{i=1}^V d_i c_i - D]$ , де  $\beta$  — множник Лагранжа. Якщо знайти мінімальне значення того функціоналу шляхом варіації пропускних спроможностей  $\{c_i\}$ , то тим самим буде вирішена сформульована вище оптимізаційна задача. При цьому визначаються оптимальні

пропускні спроможності КЗ, при яких досягається мінімальне значення середнього часу затримки повідомлень в мережі. Оптимальні пропускні спроможності КЗ визначаються виразами

$$c_{iopt} = \frac{\varphi_i}{\mu} + D_e \sqrt{\varphi_i d_i} / d_i \sum_{j=1}^V \sqrt{\varphi_j d_j}, \quad (1.17)$$

$$\text{де } D_e = D - \sum_{i=1}^V \varphi_i d_i / \mu \text{ — деяка додаткова вартість.} \quad (1.18)$$

З (1.18) випливає, що на початку проектування СПД на кожен КЗ виділяється пропускна здатність, яка відповідає навантаженню. Резервна пропускна здатність, яка залишилася, розподіляється між каналами пропорційно квадратному кореню їх навантаження. Щоб отримати кінцеву величину середнього часу затримки повідомлень в проектуємій мережі, її повна вартість повинна бути більше суми вартостей за всіма  $V$  каналах. Тоді вираз визначає додаткову вартість, яка призначена на підтримку необхідних характеристик мережі в реальних умовах роботи.

Підставивши вираз (1.17) в (1.15), отримаємо вираз для мінімального середнього часу затримки повідомлень в СПД, яке досягається при виборі оптимальних пропускних спроможностей КЗ,

$$\overline{T_{min}} = [\bar{l} / (\mu D_e)] \left[ \sum_{i=1}^V \sqrt{\varphi_i d_i / \varphi} \right]^2, \quad (1.19)$$

Співвідношення (1.19) визначає вираження для мінімально середнього часу затримки в мережі для випадку, коли пропускні спроможності КЗ обрані оптимальними. При  $D_e \rightarrow 0$  середній час затримки повідомлень необмежено зростає. Якщо  $D_e > 0$ , завдання має реалізоване на практиці рішення, при якій  $\bar{T} < \infty$ . Якщо  $D_e \leq 0$ , завдання не має реалізованого рішення.

Таким чином, співвідношення (1.17) і (1.19) дають повне рішення сформульованої оптимізаційної задачі в разі лінійної вартісної функції витрат.

Аналізуючи вираз (1.19), можна зробити ряд корисних висновків. Перш за все,  $\bar{T}$  є строго зростаючою функцією середньої довжини КЗ  $\bar{l}$ . Тому топологія мережі повинна вибирати такий, щоб отримати мінімальну величину  $\bar{l}$ . Це, звичайно ,

досягається в повно-мережі, тобто такій, де кожна пара ВК з'єднана КЗ. Але на практиці часто це неможливо з точки зору витрат.

Вищенаведені результати оптимізації отримані за умови, коли трафіки у  $\gamma_{jk}$  відомі і постійні, а процедури вибору маршрутів фіксовані. Якщо вони або невідомі або змінюються в часі, то можна задати параметри трафіку в  $\varphi_i$ , а значить оптимально розподілити трафік. Це визначає необхідність введення адаптивної процедури маршрутизації, яка допускає альтернативи вибору маршрутів з метою пошуку шляхів з недовантаженою пропускною спроможністю КЗ.

При проектуванні складних СПД виникає необхідний розв'язання окремих завдань оптимізації. Зокрема при аналізі і синтезі систем зв'язку виникає необхідність вирішення завдання пошуку множини шляхів, які існують між даними парами вузлів зв'язку. Всі методи пошуку шляхів в мережах діляться на два класи: матричні і мережеві. Матричні методи базуються на перетворенні різних матриць - топологічні або характеристик ребер графа, який описує мережу. Мережеві методи засновані на побудові дерева шляхів з фіксованих вершин-витоків до вершин-стоків деяких графів. Мережеві методи є графічним еквівалентів матричних методів.

Іншими окремими оптимізаційними задачами, які виникають при проектуванні складних мереж зв'язку, є завдання розподілу каналів і потоків інформації з урахуванням різних критеріїв ваговій характеристики шляхів. Найбільш поширеними методами розподілу каналів є методи, які використовують «найкоротші» шляху. Під «найкоротшими» розуміють шляхи найкоротші по довжині, з мінімальною кількістю транзитних ділянок, з максимальною пропускною спроможністю, з мінімальною вартістю, з максимальною надійністю. Існує ряд методів, які дозволяють привести в порядок процедуру визначення довжини рангу або інших характеристик шляхів. До матричних методів відноситься алгоритм Флойда, який дає можливість отримати як матрицю довжин найкоротших відстаней, так і маршрутну матрицю, яка визначає вершини графа, які складають шляху. Алгоритми розподілу потоків в мережі засновані на теоремах Форда і Фалкерсона про максимальний потік і мінімальному розрізі в мережі.

### 1.3 Вибір оптимальних проектних варіантів мережі передачі даних з урахуванням сукупності показників якості

У попередньому підрозділі наведено аналітичне рішення багатокритеріальної задачі оптимізації мережі зв'язку. Однак в ряді випадків не вдається отримати аналітичні вирази для показників якості проектованої мережі і застосувати аналітичні методи оптимізації [6]. При цьому знаходяться кількісні оцінки совокупності показників якості шляхом статистичного моделювання деякого множини допустимих варіантів мережі. Далі для вибору оптимальних варіантів з допустимого множини допустимих варіантів мережі може бути використана методологія багатокритеріального вибору оптимальних проектних варіантів.

Розглянемо приклад багатокритеріального вибору оптимального проектного варіанту для мережі передачі даних з пакетною комутації з урахуванням сукупності показників якості. Обрані показники якості, які визначаються часом доставки і ймовірністю втрати пакетів в рамках дейтаграмної передачі повідомлень. Ці показники якості пов'язані між собою і є антагоністичними, тобто при поліпшенні значення одного з показників інший показник якості погіршується. Таке завдання вибору оптимальних проектних варіантів мережі передачі даних актуальна для практичних застосувань, які критичні до часу доставки повідомлень, зокрема, в системі передачі відео і мовних повідомлень, системах банківських терміналів, системах сигналізації, системах усунення несправностей на мережах зв'язку.

При дослідженнях побудована математична модель топології мережі передачі даних. У структуру математичної моделі мережі введені імітатори джерел повідомлень, процедури упаковки повідомлень в пакети і передачі їх по КЗ, процедури маршрутизації і обслуговування в КК, імітатори помилок в КЗ [7]. Моделювалися джерела повідомлень з пуассоновским законом розподілу і різними інтенсивностями заявок. Передбачено також моделювання різних затримок при передачі пакетів пов'язаних з кінцевою швидкістю поширення сигналів в каналах зв'язку, фіксованою пропускною спроможністю до зв'язку, а також часом перебування пакетів в черзі на передачу по КЗ. Реалізовано різні варіанти роботи мережі, які відрізнялися дисциплінами обслуговування пакетів даних в чергу способами маршрутизації при передачі пакетів і розміром транспортного сполучення.

У розглянутому прикладі було розглянуто тридцять варіантів роботи мережі передачі даних. В результаті статистичного моделювання для кожного варіанту мережі знайдені оцінки показників якості: середнього часу доставки пакетів  $k_1$  і середньої ймовірності втрати повідомлення  $k_2 = \bar{P}$ . При цьому допустима множина варіантів роботи мережі передачі даних була складена в критеріальному просторі. На рис. 1.2 наведені значення показників якості варіантів мережі, нормовані до максимальних значень.

Тут виділена підмножина Парето-оптимальних оціночних варіантів мережі шляхом виключення безумовно гірших варіантів за критерієм Парето. Підмножині Парето-оптимальних варіантів мережі відповідає ліва нижня межа множини допустимих варіантів, яка включає варіанти: 1, 10, 11, 13, 17, 20. Серед Парето-оптимальних варіантів мережі обраний єдиний варіант із застосуванням умовного критерію переваги - умови мінімуму скалярних функцій цінності в відео результуючого показника якості у вигляді  $k_p = C_1 k_1 + C_2 k_2$ . Для випадку  $C_1 = 0,4$ ,  $C_2 = 0.6$  обраний варіант роботи мережі 11, для якого встановлено: дисципліна обслуговування заявок - у випадковому порядку, спосіб маршрутизації - рівномірний згідно ваг, розмір «вікна» передачі - рівний 8.

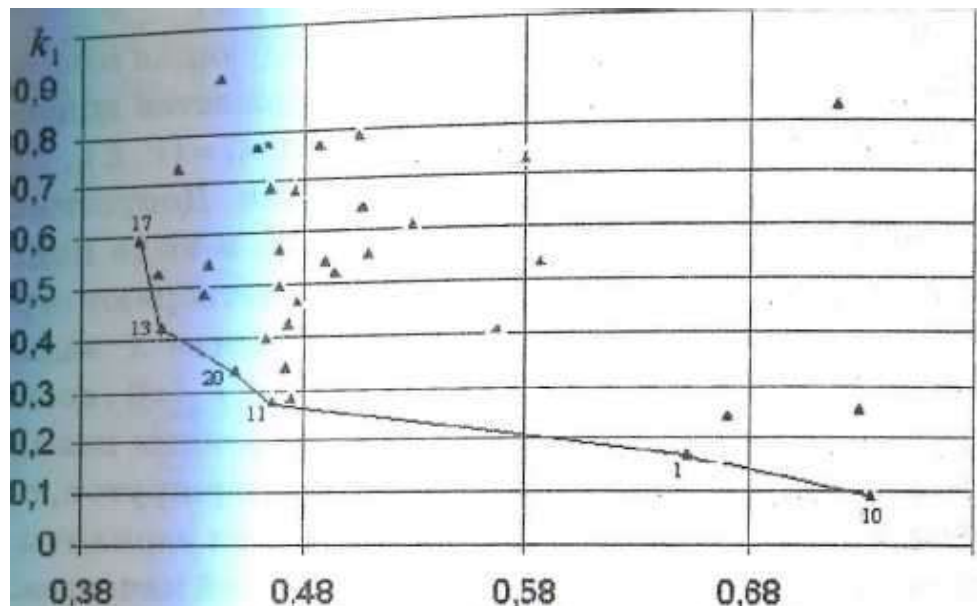


Рисунок 1.2 — Вибір Парето-оптимальних варіантів мережі передачі даних в критеріальному вимірі

## 1.4 Особливості оптимізаційних задач в телекомунікаціях

Інтенсивний розвиток і важливість галузі телекомунікацій інформаційної інфраструктури, конкуренція в цій сфері, змушує операторів зв'язку використовувати нові оптимальні засоби телекомунікацій в плануванні, розвитку і модернізації мереж різного призначення при суворому обліку сукупності техніко-економічних вимог [8].

При цьому виникає необхідність застосування багатокритеріального підходу не тільки до побудови мереж зв'язку, а й до організації бізнес-процесів в цих мережах, зокрема, в білінгових системах, системах обслуговування користувачів, системах управління мережевими ресурсами, фінансових і обчислювальних системах. Системи підтримки прийняття рішень (СППР) при багатьох критеріях в бізнес-процесах мають сьогодні особливу важливість для операторів зв'язку, тому що вони допомагають збільшити конкурентноздатність, завдяки поліпшенню бізнес процесів.

Розглянемо особливості деяких оптимізаційних завдань, що вирішуються в області телекомунікацій. При аналізі телекомунікаційних мереж використовуються різні типи моделей для підбору проектних рішень. Типові завдання проектування телекомунікації зазвичай вирішувалися в основному з використанням методів однокритеріальної оптимізації. Зокрема, це завдання переходу з мідної на оптоволоконну технологію і аналізу розвитку мереж, вибору оптимальних маршрутів і визначення мінімальної швидкості передачі, вибору архітектури мереж, розселення каналів, розташування супутників [9].

Фундаментальною проблемою в таких завданнях проектування є обчислювальна складність прийняття рішень для таких змішаних (бінарному-безперервних) оптимізаційних задач. При цьому отримували наближені рішення таких задач методами однокритеріальної оптимізації. Для цього в основному використовувалися генетичні та еволюційні алгоритми. Можна навести кілька прикладів відповідних програмних комплексів, які використовуються при плануванні телекомунікаційних мереж:

- SONET toolkit — система прийняття рішень для розробки фінансово-вигідних і гнучких оптоволоконних мереж;
- NETCAP — інтерактивна система оптимізації для планування телефонних мереж;

- ARCHANE — система прийняття рішень в розробці з'єднань між комутованими базами.

Багатокритеріальний аналіз і оптимізація має переваги над однокритеріальною оптимізацією і інтенсивно розвивається в різних технічних додатках. Однак ці методи ще не є загальноприйнятими і широко відомими серед розробників, які працюють в галузі телекомунікацій. Ще одна причина полягає в тому, що проектувальники ще не повністю реалізують постійно зростаючі можливості сучасних комп'ютерів. Раніше багатокритеріальний аналіз міг бути застосований при великих розмірностях мережевих моделей оскільки обчислювальний процес оптимізації займав багато часу. Тепер це обмеження не таке жорстке, але все рівні методи багатокритеріального аналізу застосовується для спрощених моделей і багатокритеріальний аналіз може бути використаний в телекомунікаціях, в таких завданнях: підтримка стратегічного управління, планування мереж, проектування мережевої маршрутизації.

Стратегічне управління мережею є однією з найважливіших областей застосування багатокритеріального аналізу. Наприклад, довгострокові платежі і пільги, короткострокові витрати можуть бути відображені в основних стратегічних рішеннях.

Планування і проектування телекомунікаційних мереж є дуже складним процесом. Застосування різних типів аналітичного моделювання і аналітичних технічних засобів збільшує надійність і якість телекомунікаційних мереж.

Відомо застосування методів багатокритеріальної оптимізації при номінальному плануванні мереж стільникового зв'язку, при виборі оптимальної структури і параметрів транспортних мереж управління мережами зв'язку, при маршрутизації з урахуванням сукупності показників якості.

Проблема маршрутизації стає однією з найбільш значущих областей в завданні управління мережами. Це важливе завдання тому, що телекомунікаційні мережі є інфраструктурою складової різні послуги з різним рівнем якості. У питанні маршрутизації зазвичай розглядається кілька критеріїв, таких як: вартість, ширина смуги пропускання, затримка, джиттер, втрачені пакети, ймовірність помилок. Розглянемо більш докладно особливості багатокритеріального підходу до аналізу в стратегічному управлінні та стратегічному плануванні. Вважається, що ведеться підготовка до переговорів щодо угоди про об'єднання одного телекомунікаційного оператора з іншим. З цією метою потрібно створити модель

залежності запиту на послуги зв'язку від ціни таких послуги принаймні для даної області або міста. Ця модель повинна бути доповнена моделлю витрат на поставку таких послуг. Якщо модель створена одним з операторів, то вона доповнюється постулюваною моделлю для протилежної оператора. Для регулюючого органу модель заснована на даних, наданих обома операторами відповідно до законодавства, що регулює питання приєднання. Зазначені складні моделі можуть бути оцінені з урахуванням сукупності показників якості та проаналізовані з різних точок зору:

1. Точка зору телекомунікаційного оператора. Оператор міг приймати ціни, необхідні за послуги протилежним оператором і виконувати багатокритеріальний аналіз наступної проблеми: які ціни встановлювати з метою підвищення його власного ресурсу на ринку, не втрачаючи занадто багато прибутку. Після такого аналізу, оператор може грати роль свого опонента і аналізувати відповіді іншого оператора на тій же моделі, з огляду на його власні ціни. Це може бути первинною підготовкою до фактичних переговорів щодо тарифів з'єднань.

Об'єднавши мети обох сторін - його власних, так і протилежної сторони, оператор може створити і проаналізувати багатокритеріальну модель, щоб отримати характеристику можливих компромісів в переговорах.

## 2. Точка зору регулюючого органу.

Регулюючий орган може використовувати таку модель, щоб визначити і обчислити можливий компроміс, приймаючи увагу кілька критеріїв. Регулюючий вплив могло бути використано в можливому арбітражі суперечок на угоди операторів, які з'єднуються.

## 3. Точка зору оператора домінування.

Оператор домінування може використовувати такі моделі тільки, щоб готуватися до угоди про об'єднання, але також і перевіряти, чи будуть необхідні ціни з'єднувачів далекі від узгодженого компромісу, визначеного регулюючим впливом. Якщо ціни будуть відрізнятися занадто багато від математичних очікувань регулюючого впливу, то оператор домінування робить ризик шляхом втручання своїм впливом.

Таким чином, аналіз критеріїв телекомунікаційних ринкових моделей може використовуватися операторами на ринку послуг зв'язку.

При стратегічному плануванні в телекомунікації всі плани мають три загальних компоненти - початковий стан, мета (або кінцевий стан) і засоби, що

зв'язують ці два стани. Мета процесу планування - з'єднати компоненти за найменшу ціну, щоб максимізувати ефективність планів. Слід зробити точний підрахунок всіх ресурсів і обмежень для початкового стану з метою забезпечення максимізації ефективності планування. Набагато краще оцінка ефекту початкового стану виходить, якщо всі наявні ресурси і всі критичні обмеження явно описані.

Другий компонентою є мета. За умови, що інші дві компоненти задані правильно, ця компонента стає просто мішенню. Мета повинна бути добре поставлена, досяжна, а також переглянута і змінена відповідно до вимог обставин.

Третьою компонентою плану є кошти. Ця компонента - сам план, так як по суті в ній міститься опис методу, за допомогою якого відбувається перехід від початкового стану до мети. Дві перші компоненти можна в основному розглянути теоретично; третій компонент, навпаки, більш конкретна. Вона повинна містити: фактори, що впливають на мету внутрішні і зовнішні сили, що діють на ці фактори; мети операції; свідому послідовність кроків і ймовірні стану, придатні для прийняття оптимальних рішень, які для управління процесом.

Ключ до розуміння процесів планування сценаріїв. Сценарій - це гіпотетичний результат, який сприймається і визначається за допомогою деяких припущень про поточну і майбутні тенденції. Припущення повинні бути розумними і не виходити за рамки природних обмежень, лімітів часу і технології. Є два типи сценаріїв - дослідний і випереджає. Перший слід від сьогодення до майбутнього, в той час як другий тип сценарію проходить зворотний шлях, який починається від майбутнього стану і просувається назад до справжньому, щоб виявилися впливу і дії, потрібні для реалізації бажаної мети. Кожен із сценаріїв у разі потреби можна прокрутити заново.

З проведеного аналізу особливостей оптимізаційних в області телекомунікацій можна зробити висновок про актуальну необхідність викладу в систематизованому вигляді методології багатокритеріального аналізу і вибору кращих проектних варіантів систем, яку можна запропонувати проектувальникам систем. Крім того, необхідно також розглянути практичні особливості застосування цієї методології багатокритеріального аналізу і вибору на прикладах для різних типів засобів телекомунікацій.

Аналіз розглянутих задач оптимізації в телекомунікації дозволяє виділити ряд особливостей таких завдань. Телекомунікаційні системи є складними системами і характеризуються великим числом показників якості. При

проектуванні телекомунікаційних систем виникає необхідність вибору кращого варіанту з деякого допустимого множини варіантів засобів телекомунікації з урахуванням сукупності суперечливих техніко-економічних вимог, які характеризуються значеннями відповідних показників якості. Це визначає необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації при виборі бажаних рішень з множини допустимих варіантів.

## 2 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

### 2.1 Загальні відомості з теорії багатокритеріальної оптимізації

Часто виникає завдання забезпечити оптимальність об'єкта проектування одночасно за кількома критеріями оптимальності  $\phi_k(\mathbf{X})$ ,  $k \in [1, s]$ . Зазвичай ці критерії суперечливі і оптимізація по кожному з них призводить до різних значень вектора змінних параметрів  $\mathbf{X}$ . Тому виділяється окремий клас задач багатокритеріальної оптимізації (БГО) [10].

Якщо кожним критерієм поставити у відповідність гравця, то це завдання близьке до задачі теорії ігор  $N$  осіб в її кооперативному варіанті. Відмінність в тому, що множина  $X$ , взагалі кажучи, не представимо у вигляді добутку  $X_1 \times \dots \times X_n$ , де  $X_k$ -множина стратегій  $k$ -го гравця. Ця обставина не дозволяє повністю звести розглянуту задачу до згаданої гри.

Будемо називати кожен з скалярних критеріїв оптимальності  $\phi_k(\mathbf{X})$ ,  $k \in [1, s]$  окремим критерієм оптимальності. Сукупність окремих критеріїв оптимальності  $\Phi(\mathbf{X}) = (\phi_1(\mathbf{X}), \phi_2(\mathbf{X}), \dots, \phi_s(\mathbf{X}))$  будемо називати векторним критерієм оптимальності. Припустимо, що ставиться завдання мінімізації кожного з окремих критеріїв оптимальності  $\phi_1(\mathbf{X})$ ,  $\phi_2(\mathbf{X})$ ,  $\dots$ ,  $\phi_s(\mathbf{X})$  в одній і тій же області допустимих значень  $D_{\mathbf{X}} \in R^n$ .

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації в загальному випадку не є оптимальним ні для одного з окремих критеріїв, а виявляється деяким компромісом для вектора  $\Phi(\mathbf{X})$  в цілому.

Завдання багатокритеріальної оптимізації будемо записувати у вигляді:

$$\min_{\mathbf{X} \in D_{\mathbf{X}}} \Phi(\mathbf{X}) = \Phi(\mathbf{X}^*), \quad (2.1)$$

де  $D_{\mathbf{X}}$  - множина допустимих значень вектора змінних параметрів  $\mathbf{X}$ .

Перш, ніж застосувати той чи інший метод вирішення задачі БГО, зазвичай виробляють нормалізацію окремих критеріїв, приводячи всі окремі критерії

оптимальності  $\phi_k(\mathbf{X})$ ,  $k \in [1, s]$  до одного масштабу. Найчастіше при цьому використовують відносні відхилення окремих критеріїв від їх мінімальних значень:

$$\bar{\phi}_k(\mathbf{X}) = \frac{\phi_k(\mathbf{X}) - \phi_k^*}{\phi_k^{**} - \phi_k^*}, k \in [1, s], \quad (2.2)$$

де

$$\phi_k^* = \min_{\mathbf{X} \in D_X} \phi_k(\mathbf{X}), \quad (2.3)$$

$$\phi_k^{**} = \max_{\mathbf{X} \in D_X} \phi_k(\mathbf{X}). \quad (2.4)$$

Збережемо за нормалізованими окремими критеріями оптимальності позначення  $\phi_k(\mathbf{X})$ ,  $k \in [1, s]$ .

Введемо поняття простору критеріїв  $\{\Phi\}$ . Простір критеріїв має розмірність (по числу окремих критеріїв) і утворюється ортогональними осями координат, уздовж яких відкладаються значення окремих критеріїв оптимальності  $\phi_k(\mathbf{X})$ ,  $k \in [1, s]$ . Векторний критерій оптимальності  $\Phi(\mathbf{X})$  виконує відображення множини допустимих значень  $D_X \in \{\mathbf{X}\}$  в деяку область  $D_\Phi \in \{\Phi\}$ , де  $\{\mathbf{X}\}$  - простір змінних параметрів.

Найбільшого поширення набула оптимізація по Парето.

Введемо на множині  $D_X$  співвідношення переваги  $\succ$ . Будемо говорити, що вектор  $\mathbf{X}^1 \in D_X$  краще вектора  $\mathbf{X}^2 \in D_X$ , та писати  $\mathbf{X}^1 \succ \mathbf{X}^2$ , якщо серед якщо серед рівностей і нерівностей  $\phi_k(\mathbf{X}^1) \leq \phi_k(\mathbf{X}^2)$ ,  $k \in [1, s]$  є хоча б одне суворе нерівність. Аналогічно на множини  $D_\Phi$  введемо відношення домінування: будемо говорити, що векторний критерій оптимальності  $\Phi(\mathbf{X}^1) \in D_\Phi$  домінує векторний критерій оптимальності  $\Phi(\mathbf{X}^2) \in D_\Phi$ , та писати  $\Phi(\mathbf{X}^1) \succ \Phi(\mathbf{X}^2)$ , якщо  $\mathbf{X}^1 \succ \mathbf{X}^2$ . Введені відношення переваги і ставлення домінування є транзитивними. Виділимо з множини  $D_\Phi$  підмножину  $D_\Phi^* \in D_\Phi$  крапок, для яких нема крапок, їх домінуючих.

Множина  $D_X^* \in D_X$ , відповідне  $D_\Phi^*$  називається множиною Парето (переговорним безліччю, областю компромісу) Іншими словами множиною Парето можна визначити як множина, в якому значення будь-якого з окремих критеріїв оптимальності можна поліпшити тільки за рахунок погіршення інших окремих критеріїв - будь-яка з рішень, яке належить множині Парето, не може бути покращено одночасно по всім окремим критеріям [11].

Роль множини Парето при вирішенні задач багатокритеріальної оптимізації визначається наступною теоремою:

Теорема 1. Якщо для деяких вагових множників  $\lambda_k, k \in [1, s]$  і вектора  $X^* \in D_X$  має місце рівність:

$$\sum_{k=1}^s \lambda_k \phi_k(X^*) = \min_{X \in D_X} \sum_{k=1}^s \lambda_k \phi_k(X), \quad (2.5)$$

то вектор  $X^*$  оптимальний по Парето тобто  $X^* \in D_X$ .

Теорема показує, що вибір певної точки з множини Парето еквівалентний вказівкою ваги для кожного з окремих критеріїв оптимальності. На цьому факті засновано велику кількість чисельних методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації.

Для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації (1) широко використовуються методи, засновані на зведенні задачі багатокритеріальної оптимізації до задачі однокритеріальної оптимізації. Розглянемо кілька методів цієї групи [12].

## 2.2 Метод вагових множників

У методі вагових множників додатковою інформацією (щодо інформації, заданої в постановці загальної задачі є інформація про відносну важливість окремих критеріїв. Метод вимагає, щоб ця інформація була формалізована в значеннях вагових множники  $\lambda_k, k \in [1, s]$ . У цьому випадку в якості скалярного критерію використовується критерій:

$$\varphi(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^s \lambda_k \phi_k(\mathbf{X}), \lambda_k \geq 0, \sum_{k=1}^s \lambda_k = 1. \quad (2.6)$$

Тобто замість завдання (1) вирішується багатовимірна задача умовної оптимізації зі скалярним критерієм оптимальності

$$\min_{\mathbf{X} \in D_{\mathbf{X}}} \varphi(\mathbf{X}) = \min_{\mathbf{x} \in D_{\mathbf{x}_i=1}} \sum_{i=1}^s \lambda_i \phi_i(\mathbf{X}) = \varphi(\mathbf{X}^*). \quad (2.7)$$

Існують різні способи вибору вагових множники  $\lambda_k, k \in [1, s]$  Одним з таких способів є призначення коефіцієнтів в залежності від відносної важливості відповідних окремих критеріїв оптимальності. Для того щоб при виборі вагових множників  $\lambda_k, k \in [1, s]$  позбутися від впливу масштабів окремих критеріїв оптимальності, в методі вагових множників доцільно використовувати нормалізовані критерії.

Недоліком методу є те, що в разі неопуклої множини Парето не всі точки множини можуть бути досягнуті за допомогою зміни вагових множників.

### 2.3 Метод епсилон обмежень

У методі  $\varepsilon$ -обмежень в якості скалярного критерію оптимальності  $\varphi(\mathbf{X})$  використовується найважливіший з окремих критеріїв оптимальності  $\phi_p(\mathbf{X})$  а інші окремі критерії враховуються за допомогою обмежень типу нерівностей виду  $\phi_k(\mathbf{X}) \leq \varepsilon_k, k \in [1, s], k \neq p$  Додатковою інформацією в методі  $\varepsilon$ -обмежень є інформація про номер найважливішого з окремих критеріїв, а також інформація про максимально допустимі значення окремих критеріїв.

Таким чином, в методі  $\varepsilon$ -обмежень замість загального завдання вирішується завдання умовної оптимізації зі скалярним критерієм оптимальності  $\phi_p(\mathbf{X})$ :

$$\min_{\mathbf{X} \in \tilde{D}} \varphi(\mathbf{X}) = \min_{\mathbf{X} \in \tilde{D}} \phi_p(\mathbf{X}) = \varphi(\mathbf{X}^*). \quad (2.8)$$

$$\tilde{D} = D_X \cap D_P, D_P = \{X \mid \phi_k(X) \leq \varepsilon_k, k \in [1, s], k \neq p\}. \quad (2.9)$$

Метод  $\varepsilon$ -обмежень в значній мірі вільний від зазначеного вище недоліку методу вагових множників в разі, коли множина не опукла. Недоліком методу  $\varepsilon$ -обмежень є труднощі вибору максимально допустимих значення окремих критеріїв  $\varepsilon_k, k \in [1, s], k \neq p$  які гарантували б досяжність деякого рішення. Крім того, жорсткість обмежень  $\phi_k(X) \leq \varepsilon_k, k \in [1, s], k \neq p$  далеко не завжди адекватна уявленням ЛПР (особи, що приймає рішення) про найкращий вирішенні. Відзначимо також труднощі побудови в явному або неявному вигляді множин  $D_P$ .

## 2.4 Метод справедливого компромісу

Справедливим компромісом будемо називати такий компроміс, при якому відносний рівень зниження якості по одному або декільком окремим критеріям не перевищує відносного рівня підвищення якості по іншим окремим критеріям (менше або дорівнює).

Для формалізації поняття справедливого компромісу введемо відношення переваги на множині Парето. Нехай в множині Парето задачі (1) дано дві точки  $X^1 \in D_X^*$  та  $X^2 \in D_X^*$  і значення всіх окремих критеріїв оптимальності в них  $\phi_k(X^1), \phi_k(X^2), k \in [1, s]$ . Введемо міру відносного зміни (зниження - знак "мінус" або підвищення - знак "плюс") якості рішення по кожному з цих критеріїв:

$$\Delta \tilde{\phi}_k(X^1, X^2) = \frac{\Delta \phi_k(X^1, X^2)}{|\max_{X \in \{X^1, X^2\}} \phi_k(X)|}, k \in [1, s], \quad (2.10)$$

де  $\Delta \phi_k(X^1, X^2) = \phi_k(X^1) - \phi_k(X^2)$  - абсолютні зміни значень окремих критеріїв оптимальності  $\phi_k(X), k \in [1, s]$  при переході від параметру  $X^1$  до параметру  $X^2$ . Обчислимо максимальне зниження якості рішення при переході від параметра  $X^1$  до параметру  $X^2$ :

$$\Delta\tilde{\Phi}_{\min}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2) = \min_{k \in [1, s]} \Delta\tilde{\Phi}_k(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2). \quad (2.11)$$

Аналогічно обчислимо максимальне підвищення якості рішення при переході від параметра  $\mathbf{X}^1$  до параметру  $\mathbf{X}^2$ :

$$\Delta\tilde{\Phi}_{\max}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2) = \max_{k \in [1, s]} \Delta\tilde{\Phi}_k(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2). \quad (2.12)$$

Будемо говорити, що параметр  $\mathbf{X}^2$  перевершує параметр  $\mathbf{X}^1$  та писати:

$$\mathbf{X}^2 \succ \mathbf{X}^1, \text{ якщо } |\Delta\tilde{\Phi}_{\max}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2)| > |\Delta\tilde{\Phi}_{\min}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2)|. \quad (2.13)$$

З іншого боку, будемо говорити, що  $\mathbf{X}^1$  параметр перевершує параметр  $\mathbf{X}^2$  та будемо писати:

$$\mathbf{X}^1 \succ \mathbf{X}^2, \text{ якщо } |\Delta\tilde{\Phi}_{\max}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2)| \leq |\Delta\tilde{\Phi}_{\min}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2)|. \quad (2.14)$$

Таким чином, додатковою інформацією в методі справедливого компромісу є інформація про однакову важливість всіх окремих критеріїв  $\Phi_p(\mathbf{X})$  а також інформація про справедливий компроміс, формалізована ставленням переваги.

Оскільки метод справедливого компромісу використовує відносні зміни окремих критеріїв оптимальності, цей метод інваріантний до масштабу виміру окремих критеріїв, тобто не потрібно їх нормалізація.

## 2.5 Метод наближення до ідеального рішення

Ідеальним рішенням задачі багатокритеріальної оптимізації (1) називається вектор

$$\Phi^* = (\phi_1^*, \phi_2^*, \dots, \phi_s^*), \quad (2.15)$$

де  $\phi_k^* = \min_{\mathbf{X} \in D_X} \phi_k(\mathbf{X})$ ,  $k \in [1, s]$  – мінімальне значення окремого критерію оптимальності  $\phi_k(\mathbf{X})$  в множині  $D_X$ . Нагадаємо, що вектори  $\mathbf{X}_k^*$ ,  $k \in [1, s]$  доставляють мінімуми відповідним критеріям оптимальності  $\phi_k(\mathbf{X})$  взагалі кажучи, різні.

Введемо в розгляд скалярний критерій оптимальності:

$$\varphi(\mathbf{X}) = \|\bar{\Phi}(\mathbf{X}) - \bar{\Phi}^*\|, \quad (2.16)$$

де  $\|\cdot\|$  – деяка векторна норма, наприклад, евклідова. Нормований векторний критерій оптимальності:

$$\bar{\Phi}(\mathbf{X}) = \left( \frac{\phi_1(\mathbf{X})}{\phi_1^*}, \frac{\phi_2(\mathbf{X})}{\phi_2^*}, \dots, \frac{\phi_s(\mathbf{X})}{\phi_s^*} \right)^T. \quad (2.17)$$

Нормоване ідеальне вирішення (одиничний  $(s^* 1)$  - вектор):

$$\bar{\Phi}^* = \left( \frac{\phi_1^*}{\phi_1^*}, \frac{\phi_2^*}{\phi_2^*}, \dots, \frac{\phi_s^*}{\phi_s^*} \right)^T = (1, 1, \dots, 1). \quad (2.18)$$

У методі наближення до ідеального рішення замість загального завдання вирішується завдання умовної оптимізації зі скалярним критерієм оптимальності:

$$\min_{\mathbf{X} \in D_X} \varphi(\mathbf{X}) = \min_{\mathbf{X} \in D_X} \|\bar{\Phi}(\mathbf{X}) - \bar{\Phi}^*\| = \varphi(\mathbf{X}^*). \quad (2.19)$$

Зауважимо, що якщо  $\|\cdot\|$  – евклідова норма, то скалярний критерій оптимальності є квадратичною функцією компонент вектора  $\mathbf{X}$ . Тому якщо, додатково, множина  $D_X$  є опуклим, то поставлена задача являє собою задачу квадратичного програмування. Цей факт значно спрощує рішення поставленого завдання. Додатковою інформацією в методі наближення до ідеального рішення є

інформація, укладена в способі згортання векторного критерію оптимальності  $\Phi(\mathbf{X}) = (\phi_1(\mathbf{X}), \phi_2(\mathbf{X}), \dots, \phi_s(\mathbf{X}))$  в скалярний критерій  $\varphi(\mathbf{X})$ .

Оскільки метод наближення до ідеального рішення використовує нормовані окремі критерії оптимальності, цей метод інваріантний до масштабу виміру окремих критеріїв.

## 2.6 Евристична процедура вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації

Для вибору єдиного рішення з області компромісів необхідно обґрунтувати аксіоматику і на її основі сформулювати правило (схему компромісу) прийняття рішення. Для вирішення цього завдання потрібна додаткова інформація, яку можна отримати шляхом аналізу і формалізації особливостей мети системи.

Найважливішим результатом аналізу особливостей мети системи є встановлення взаємної важливості окремих критеріїв, що надає основу для вибору схеми компромісу. Залежно від особливостей системи і результатів такої формалізації можна виділити кілька ситуацій прийняття єдиного рішення в умовах багатокритеріальності

Ситуація 1. Відомі кількісні значення вагових коефіцієнтів окремих критеріїв.

Ситуація 2. Кількісні значення вагових коефіцієнтів невідомі, але ЛПР має інформацію, що дозволяє ранжувати окремі критерії за важливістю.

Далі ранги перераховуються в вагові коефіцієнти за певними формулами.

Ситуація 3. ЛПР не має ні кількісної, ні якісної інформацією про коефіцієнти  $a_i$ . У цьому випадку не слід віддавати перевагу якомусь критерію і логічно використовувати схему рівності або квазірівності критеріїв.

Нехай  $\{I\}$  є множина варіантів вирішення завдання БГО (множина Парето). Якість кожного  $i$ -го варіанту оцінюється окремим критерієм  $K_i = [K_{i1}, \dots, K_{im}]^T$ .

Потрібно визначити варіант  $I^* \in \{I\}$ , при якому забезпечуються задовільні значення всіх  $m$  показників  $K_i$ , при  $i = \overline{1, m}$ , і найкращий компроміс між ними з урахуванням властивостей множини  $\{I\}$  і апріорної інформації про співвідношення важливості показників. Розглядаються наступні випадки наявності апріорної інформації про важливість показників:

- Задані ваги показників;

- Задана зіставна важливість показників;
- Відсутня інформація про важливість показників;

Алгоритм, за допомогою якого відшукується рішення задачі вибору, враховує роль кожного окремого критерію з точки зору його впливу на властивості системи в цілому за допомогою вагових коефіцієнтів або коефіцієнтів важливості  $P_j$ , причому  $\sum_{j=1}^m P_j = 1$ . Функція корисності для кожного варіанта  $i \in \{I\}$  задається у вигляді узагальненого адитивного критерію:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m P_j q_{ij} , \quad (2.20)$$

де  $i = \overline{1, n}$  - номер варіанту системи;  $j = \overline{1, m}$  - номер окремого критерію;  $q_{ij} = \xi_{ij}[K_{ij}(x)]$  - функція корисності  $j$ -го окремого критерію в  $i$ -му варіанті системи і визначається з формули

$$\xi_i(K_i) = \left( \frac{K_i - K_{\text{інх}}}{K_{\text{інл}} - K_{\text{інх}}} \right)^{\alpha_i} \text{ при } \alpha_i = 1. \quad (2.21)$$

Визначення вагових коефіцієнтів стикається з серйозними труднощами і зазвичай зводиться до експертної оцінки. Для спрощення роботи експертів іноді пропонується вимагати від них тільки ранжирування критеріїв за важливістю. Далі ранги перераховуються в вагові коефіцієнти за певними формулами. У разі ж, коли ЛПР не має ні кількісної, ні якісної інформацією про коефіцієнти, логічно використовувати «рівність» критеріїв.

Пошук оптимального рішення проводиться за такою процедурою: Досліджується множина всіх варіантів  $\{I\}$  і проводиться оптимізація по кожному з показників  $K_{ij}$ . Отримані максимуми утворюють вектор  $Z1$ . Цей вектор містить «найкращі» значення окремих критеріїв по всьому множини варіантів  $\{I\}$  і використовується далі ЛПР для прийняття рішення. (аксіоматика прийняття рішення)

$$Z1 = \begin{vmatrix} \max_{i \in \{I\}} K_{i1} \\ \dots\dots\dots \\ \max_{i \in \{I\}} K_{im} \end{vmatrix}$$

Проводиться оптимізація за сумарним критерієм  $Q_i$ . Найбільшим значенням  $Q_1 = \max\{Q_i\}$ , відповідає варіант системи з параметром  $1 \in \{I\}$  значення окремих критеріїв  $K_{ij}$  варіанту  $1 (j=\overline{1,m})$  записується у вигляді вектора  $Y1$ , який пред'являється ЛПР як рішення.

$$Y1 = \begin{vmatrix} K_{11} \\ \dots\dots\dots \\ K_{1m} \end{vmatrix}$$

Після перед ЛПР ставиться питання: «Чи всі показники мають задовільний значення?» При відповіді на це питання використовується вектор  $Z1$ . У разі негативної відповіді ЛПР виділяє приватний критерій з номером  $r$ , який має найменш задовільний значення, а також вказує його величину  $K_r$  таку, що значення показника  $r$  можна вважати задовільним.

Структурна схема алгоритму процедури пошуку оптимального рішення приведена в додатку В.

## 3 ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕДУРИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ЕКСПЕРТІВ ДО ВИРІШЕННЯ ДЕЯКИХ ЗАВДАНЬ ОПТИМІЗАЦІЇ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

### 3.1 Багатокритеріальний вибір оптимальних варіантів мовних кодеків

#### 3.1.1 Вибір і визначення основних параметрів кодеків, що впливають на якість передачі мови в IP-телефонії

В даному розділі за допомогою обчислювальної моделі, відомої як E-модель, яка визнана корисним інструментом при плануванні передачі сигналів для оцінки комбінованих ефектів зміни різних параметрів передачі, що впливають на якість переговорів, проведена оцінка якості передачі для основних кодеків, що використовуються в IP-телефонії [13]. Дана обчислювальна модель може бути використана, зокрема, проектувальниками телекомунікаційних мереж для того, щоб гарантувати користувачам задовільний наскрізне якість передачі без додаткових ускладнень проектування мереж. Характеристики основних кодеків представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики кодеків

| Кодек   | Метод компресії | Швидкість кодування | Складність реалізації    | Затримка                  |
|---------|-----------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| G.726   | ADPCM           | 32/ 24/16 кбіт/с    | Низька<br>(8 MIPS)       | Дуже низька<br>(0,125 мс) |
| G.729   | CS-CELP         | 8 кбіт/с            | Висока (30 MIPS)         | Низька (10мс)             |
| G.711   | CA-CELP         | 8 кбіт/с            | Помірна (20 MIPS)        | Низька<br>(10 мс)         |
| G.723.1 | MP-MLQ          | 6,4/5,3 кбіт/с      | Помірна (16 MIPS)        | Висока<br>(37 мс)         |
| G.728   | LD-CELP         | 16 кбіт/с           | Дуже висока<br>(40 MIPS) | Дуже низька<br>(3-5 мс)   |

На першому етапі будь-якого обчислення з Е-моделлю [14] результатом є коефіцієнт рейтингу передачі  $R$ , який об'єднує всі параметри передачі, що мають відношення до цього з'єднання. Цей коефіцієнт рейтингу  $R$  складається з наступних складових:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_{e-eff} + A. \quad (3.1)$$

В принципі  $R_o$  представляє основне співвідношення сигнал / шум, включаючи такі джерела шуму, як шум ланцюга і шум приміщення. Коефіцієнт  $I_s$  представляє комбінацію з усіх знижень якості, які діють на мовний сигнал більш-менш одночасно. Коефіцієнт  $I_d$  являє зниження якості, що викликається затримкою, а коефіцієнт зниження ефективності обладнання  $I_{e-eff}$  представляє зниження якості, що викликається кодеками з низькою бітовою швидкістю. Цей коефіцієнт також включає зниження якості через втрату пакетів з довільним розподілом. Коефіцієнт виграшу  $A$  дозволяє компенсувати коефіцієнти зниження якості в тих випадках, коли існують інші переваги доступу до користувача. Член  $R_o$  і величини  $I_s$  і  $I_d$  поділяють на подальші специфічні значення зниження якості [15].

Основне відношення сигнал / шум  $R_o$  визначено як:

$$R_o = 15 - 1,5(SLR + N_o), \quad (3.2)$$

де член  $N_o$  [в дБм] представляє складання по потужності від різних джерел шуму (дБм - абсолютний рівень потужності психофотрического сигналу щодо 1 мВт в точці з нульовим рівнем):

$$N_o = 10 \log \left[ 10^{\frac{N_c}{10}} + 10^{\frac{N_{os}}{10}} + 10^{\frac{N_{or}}{10}} + 10^{\frac{N_{fo}}{10}} \right], \quad (3.3)$$

де член  $N_c$  [в дБм] представляє суму всіх джерел потужності шуму ланцюга щодо точки 0дБо; член  $N_{os}$  [в дБм] представляє еквівалентний шум ланцюга в точці 0 дБо, викликаний шумом приміщення  $P_s$  на передавальній стороні:

$$N_{os} = P_s - SLR - D_s - 100 + 0,004(P_s - OLR - D_s - 14)^2, \quad (3.4)$$

де  $OLR = SLR + RLR$ . Таким же чином шум приміщення  $P_r$  на приймальній стороні перетворюють в еквівалентний шум ланцюга  $N_{or}$  [в дБм0п] в точці 0 дБо.

$$N_{or} = RLR - 121 + P_{re} + 0,008(P_{re} - 35)^2, \quad (3.5)$$

де член  $P_{re}$  [в дБм0п] представляє "ефективний шум приміщення", викликаний збільшенням на  $P_r$  зарахунок ланцюга місцевого ефекту слухача користувача:

$$P_{re} = P_r + 10 \log \left[ 1 + 10^{\frac{(10-LSTR)}{10}} \right], \quad (3.6)$$

де  $N_{fo}$  [в дБм0п] представляє "нижній рівень шуму" на приймальній стороні:

$$N_{fo} = N_{for} + RL, \quad (3.7)$$

які зазвичай приймаються значенням  $N_{for}$ , рівним -64 дБмп.

Коефіцієнт  $I_s$  представляє суму всіх знижень якості, які можуть статися більш-менш одночасно при передачі мови. Надалі коефіцієнт  $I_s$  поділяють на три специфічних коефіцієнта зниження якості:

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q. \quad (3.8)$$

Коефіцієнт  $I_{olr}$  представляє викликане занадто низькими значеннями  $OLR$  зниження якості, яке визначають як:

$$I_{olr} = 20 \left[ \left\{ 1 + \left( \frac{X_{olr}}{8} \right)^8 \right\}^{\frac{1}{8}} - \frac{X_{olr}}{8} \right], \quad (3.9)$$

де

$$X_{olr} = OLR + 0,2(65 + N_o - RLR). \quad (3.10)$$

Коефіцієнт  $I_{st}$  представляє зниження якості, викликати не оптимальним місцевим ефектом:

$$I_{st} = 12 \left[ 1 + \left( \frac{STM_{Ro}-13}{6} \right)^8 \right]^{\frac{1}{8}} - 28 \left[ 1 + \left( \frac{STM_{Ro}+1}{19,4} \right)^{35} \right]^{\frac{1}{35}} - \\ - 13 \left[ 1 + \left( \frac{STM}{33} \right)^{13} \right]^{\frac{1}{13}} + 29, \quad (3.11)$$

де

$$STM_{Ro} = -10 \log \left[ 10^{\frac{STM}{10}} + e^{\frac{T}{4}} 10^{\frac{TEL_R}{10}} \right], \quad (3.12)$$

Коефіцієнт зниження якості  $I_q$  представляє зниження якості, викликане спотвореннями квантування:

$$I_q = 15 \log[1 + 10^Y + 10^Z], \quad (3.13)$$

$$Y = \frac{Ro-100}{15} + \frac{46}{8,4} - \frac{G}{9}, \quad (3.14)$$

$$Z = \frac{46}{30} - \frac{G}{40}, \quad (3.15)$$

$$G = 1,07 + 0,258Q + 0,0602Q^2, \quad (3.16)$$

$$Q = 37 - 15 \log(qdu). \quad (3.17)$$

У цій формулі  $qdu$  означає число пристроїв  $qdu$  для всього з'єднання між передавальною стороною і приймальною стороною.

Коефіцієнт зниження якості  $I_d$ , який також представляє всі зниження якості через затримку мовних сигналів, далі поділяють на три коефіцієнта  $I_{dte}$ ,  $I_{dle}$  і  $I_{dd}$ :

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (3.18)$$

Коефіцієнт  $I_{dte}$  дає оцінку зниження якості через відлуння говорить:

$$Idte = \left[ \frac{Roe-Re}{2} + \sqrt{\frac{(Roe-Re)^2}{4} + 100} - 1 \right] (1 - e^{-T}), \quad (3.19)$$

$$Roe = -1,5(No - RLR), \quad (3.20)$$

$$Re = 80 + 2,5(TErv - 14), \quad (3.21)$$

$$TErv = TELR - 40 \log \frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} + 6e^{-0,3T^2}. \quad (3.22)$$

Для значень  $T < 1$  мс відлуння розмовляючого слід розглядати як місцевий ефект, тобто  $Idte = 0$ . Отже, обчислювальний алгоритм об'єднує вплив STMR на відлуння говорить. Беручи до уваги, що низькі значення STMR можуть створювати для луни говорить деякі маскують ефекти, а для дуже високих значень STMR відлуння говорить може стати більш помітним, члени  $TErv$  і  $Idte$  вибирають в такий спосіб: для  $STMR < 9$  дБ: у формулі (3.21)  $TErv$  замінюють на  $TErv_s$ , де:

$$TErv_s = TErv + \frac{Ist}{2}, \quad (3.23)$$

Для  $9 \text{ дБ} \leq STMR \leq 20 \text{ дБ}$  застосовують вищенаведені формули (2.19) - (2.22); для  $STMR > 20 \text{ дБ}$ : у формулі (2.18)  $Idte$  замінюють на  $Idtes$ , де:

$$Idte = \sqrt{Idte^2 + Ist^2}, \quad (3.24)$$

Коефіцієнт  $Idle$  представляє зниження якості через луни слухача. Для цього використовують формули:

$$Idle = \frac{Ro-Rle}{2} + \sqrt{\frac{(Ro-Rle)^2}{4} + 169}, \quad (3.25)$$

$$Rle = 10,5(WELP + 7)(Tr + 1)^{-0,25}. \quad (3.26)$$

Коефіцієнт  $I_{dd}$  представляє зниження якості, викликане тривалою абсолютної затримкою  $T_a$ , яка має місце навіть при дуже хорошому придушенні луни [6].

Для  $T_a \leq 100$  мс:  $I_{dd} = 0$

Для  $T_a > 100$  мс:

$$I_{dd} = 25 \left\{ (1 + X^6)^{\frac{1}{6}} - 3 \left( 1 + \left[ \frac{X}{3} \right]^6 \right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\}, \quad (3.27)$$

$$X = \frac{\log\left(\frac{T_a}{100}\right)}{\log 2}. \quad (3.28)$$

Значення коефіцієнта  $I_e$  зниження якості обладнання із-за використання елементів низькошвидкісних кодеків не пов'язані з іншими вхідними параметрами. Ці значення залежать від результатів тестування за суб'єктивною усередненою оцінкою (mean opinion score), а також від досвіду роботи в мережі [16] [17]. Раніше, при довільній втраті пакетів, особливі значення коефіцієнта зниження якості кодека інтерпретували, користуючись табульованим значенням  $I_e$ , залежними від втрати пакетів. Тепер в якості спеціального значення кодека визначено коефіцієнт стійкості до втрати пакетів  $B_{pl}$ . Залежить від втрати пакетів коефіцієнт зниження ефективності обладнання  $I_{e-eff}$  знаходять, використовуючи характерний для кодека коефіцієнт зниження якості обладнання при нульовій втраті пакетів  $I_e$  і коефіцієнт стійкості до втрати пакетів  $B_{pl}$ . При ймовірності втрати пакетів  $P_{pl}$  коефіцієнт  $I_{e-eff}$  обчислюють за формулою:

$$I_{e-eff} = I_e + (95 - I_e) * \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{B_{urstR}} + B_{pl}}, \quad (3.29)$$

де  $B_{urstR}$  - це так званий коефіцієнт сплеску (Burst Ratio).

Наприклад, для втрати пакетів з розподілом, відповідним моделі Маркова з двома станами і з вірогідністю  $p$  переходів від стану "виявлений" до стану "втрачений" і з вірогідністю  $q$  - від стану "втрачений" до стану "виявлений", коефіцієнт сплеску може бути обчислений як:

$$\text{BurstR} = \frac{1}{p+q} = \frac{P_{pl}/100}{p} = \frac{1-P_{pl}/100}{q} . \quad (3.30)$$

Як видно з формули (3.29), коефіцієнт зниження ефективності обладнання в разі  $P_{pl} = 0$  (відсутність втрати пакетів) дорівнює значенню  $I_e$ .

Як параметр якості передачі виступає так званий R-фактор, що змінюється в межах  $[0; 100]$  і відображає задоволеність користувача якістю сервісу, що надається передачею мови. Взаємозв'язок R-фактора, задоволеності користувачів та оцінки MOS приведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Взаємозв'язок R-фактора, MOS і думки користувачів

| R-фактор | Думка користувача                  | Оцінка MOS |
|----------|------------------------------------|------------|
| 100-90   | Добре                              | 5,0 – 4,3  |
| 90-80    | Задовільно                         | 4,3 – 4,0  |
| 80-70    | Деякі користувачі незадоволені     | 4,0 – 3,6  |
| 70-60    | Багато користувачів незадоволені   | 3,6 – 3,1  |
| 60-50    | Майже всі користувачі незадоволені | 3,1 – 2,6  |
| 50-0     | Не рекомендується                  | 2,6 – 1,0  |

За допомогою засобів програмного пакета MATLAB на основі E-моделі була створена модель оцінки якості мови. Результати дослідження для різних кодеків наведені на рис. 3.1-3.5. Текст програми приведений в додатку А.

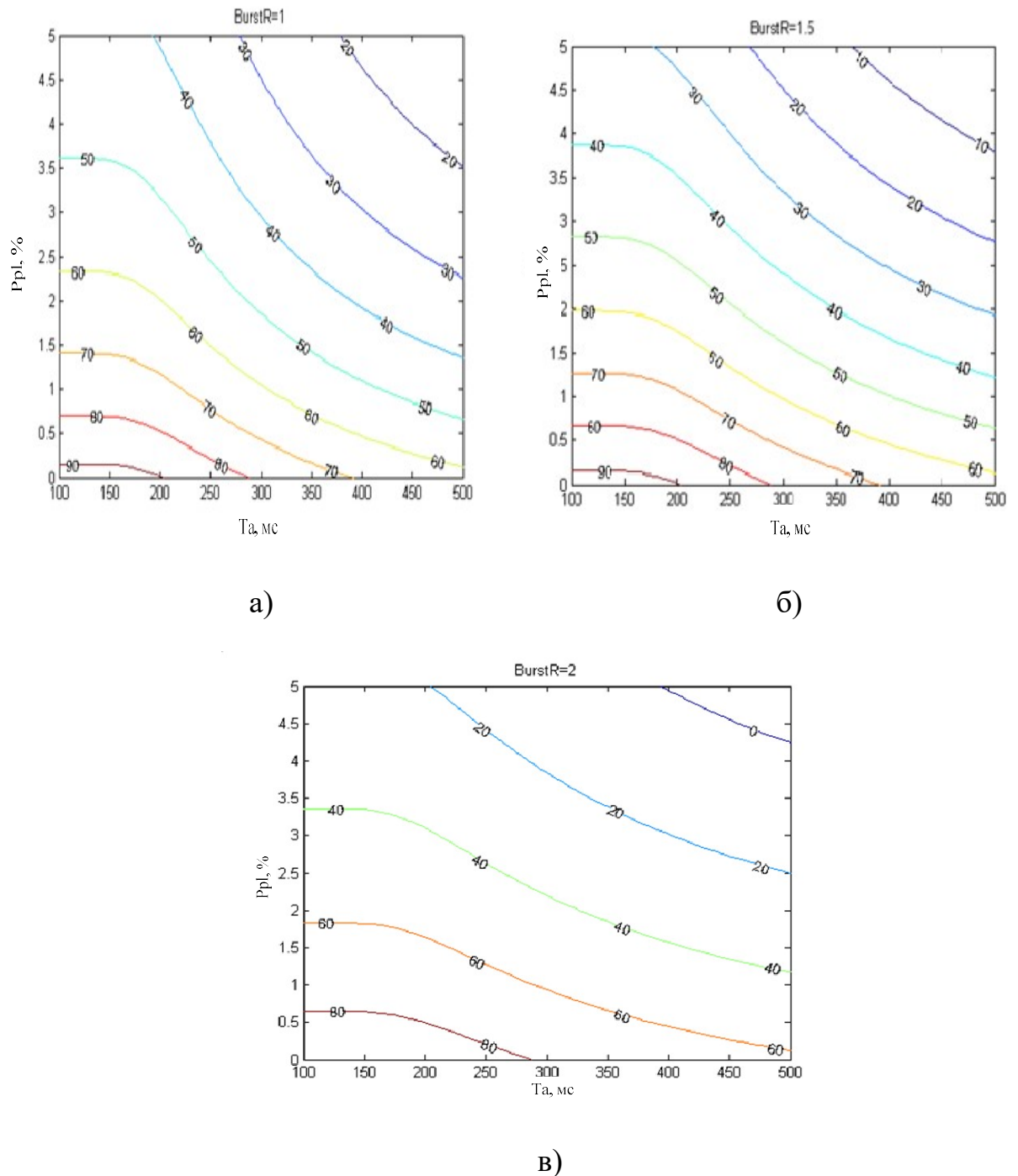


Рисунок 3.1 – Залежність якості передачі від ймовірності втрати пакета Ppl і значення абсолютної затримки Ta для кодека G.711 при BurstR = 1, 1.5, 2

З наведених залежностей можна зробити висновок, що даний кодек чутливий до втрат в більший мірі, ніж до збільшення значення абсолютної затримки. Також очевидно, що при групових втраті пакетів (BurstR = 2) якість передачі різко погіршується в порівнянні з BurstR = 1 і 1.5. Максимальний коефіцієнт якості мови,

який може забезпечити даний кодек при нульовій ймовірності втрати пакета і затримки менше 100 мс, дорівнює 93,4.

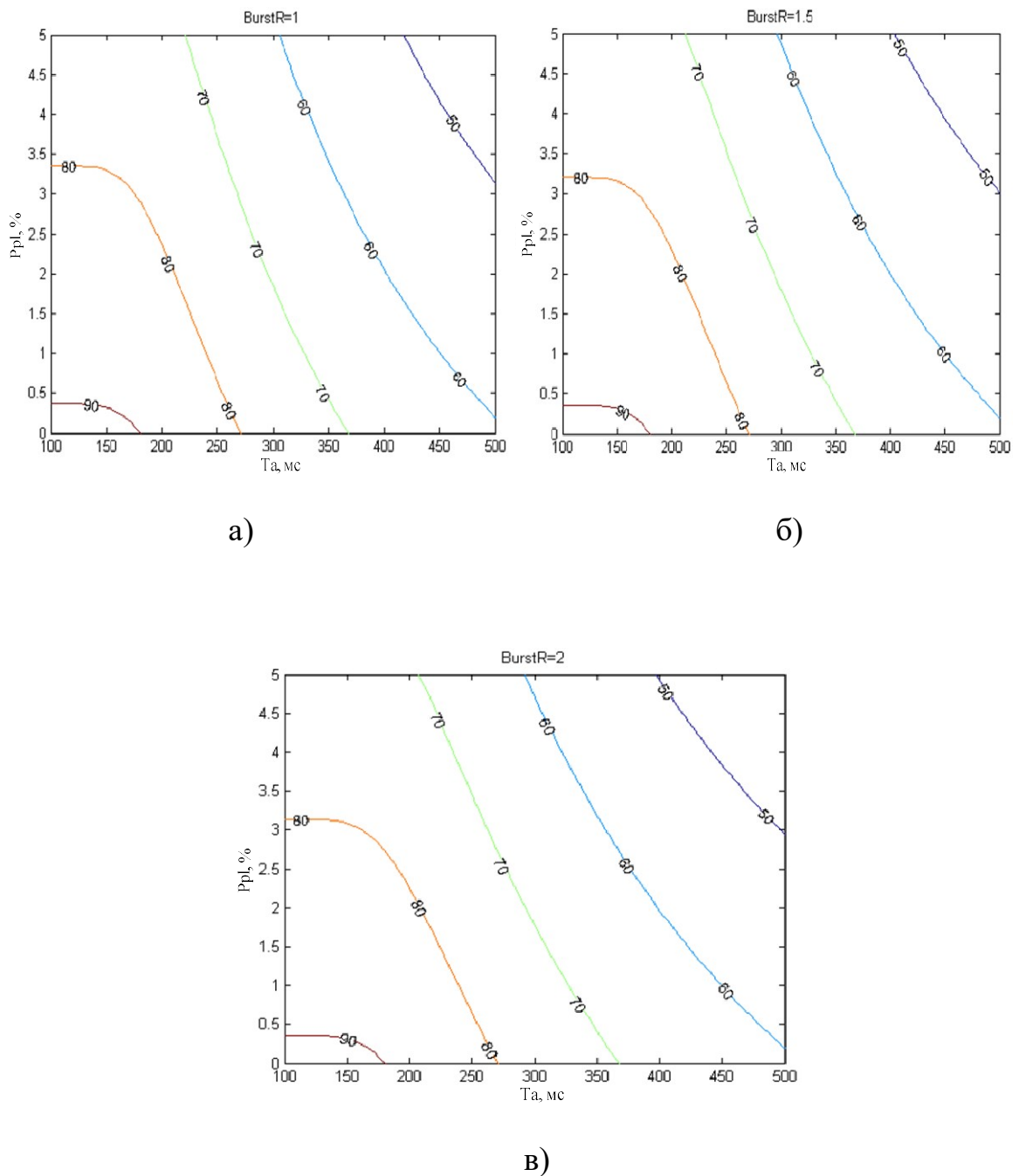


Рисунок 3.2 – Залежність якості передачі від ймовірності втрати пакета  $P_{pl}$  і значення абсолютної затримки  $T_a$  для кодека G.726 при  $BurstR = 1, 1.5, 2$

Як випливає з наведених залежностей, для забезпечення заданого рівня якості передачі мови при використанні кодека G.726 в першу чергу необхідно забезпечити мінімальну затримку передачі. Втрати пакетів незначно позначаються на якості, і,

як наслідок, даний кодек є стійким до групових втрат пакетів. За ідеальних умов передачі даний кодек забезпечує качество R на рівні 91,4.

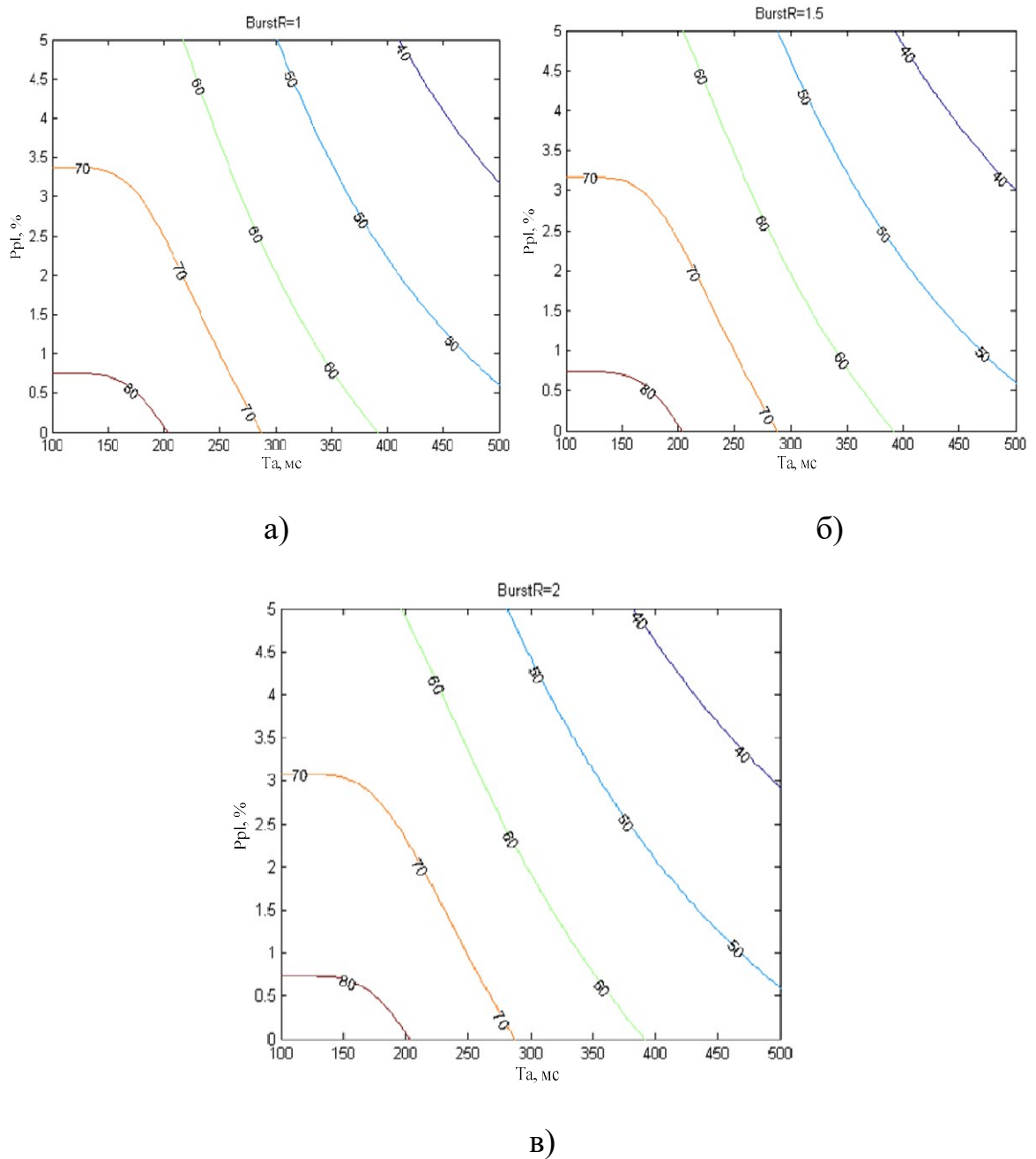


Рисунок 3.3 – Залежність якості передачі від ймовірності втрати пакета  $P_{rp}$  і значення абсолютної затримки  $T_a$  для кодека G.729 при  $BurstR = 1, 1.5, 2$

Властивості даного кодека аналогічні властивостям кодека G.726: він також володіє стійкістю до втрат пакетів, в тому числі і груповим, але має незначне погіршення якості зі зростанням значення абсолютної затримки  $T_a$ . Коефіцієнт

рейтингу даного кодека в ідеальних умовах дорівнює 83,4, що на 8 пунктів менше ніж у G.726.

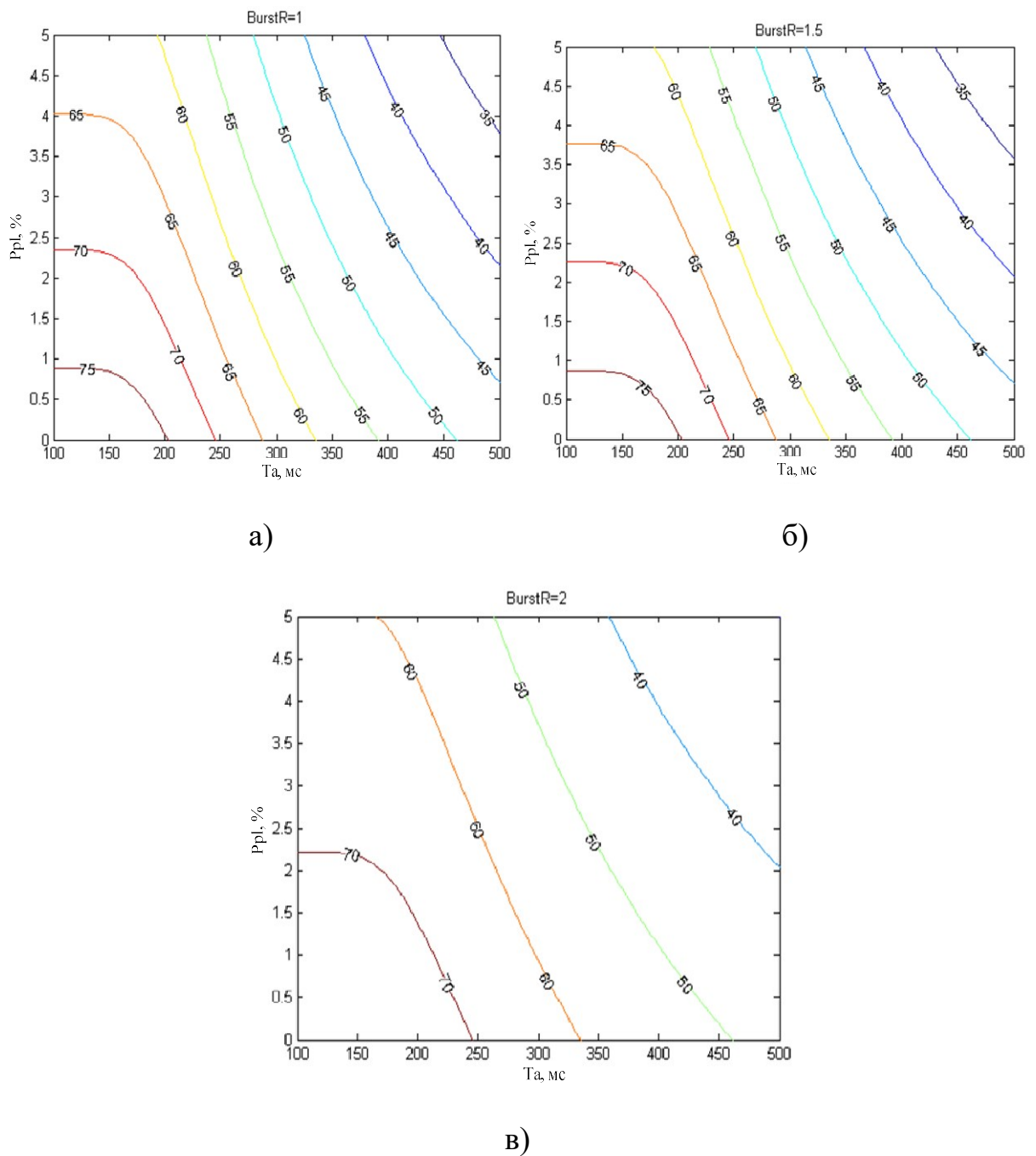


Рисунок 3.4 – Залежність якості передачі від ймовірності втрати пакета  $P_{pl}$  і значення абсолютної затримки  $T_a$  для кодека G.723.1 при  $BurstR = 1, 1.5, 2$

Даний кодек володіє найменшим коефіцієнтом рейтингу в ідеальних умовах з усіх кодеків, використовуваних в IP-телефонії, що дорівнює 78,4. Якість передачі для цього кодека в значній мірі залежить як від значення абсолютної затримки, так

і від ймовірності втрати пакета. При використанні даного кодека необхідно дотримуватися жорсткі вимоги до параметрів мережі передачі.

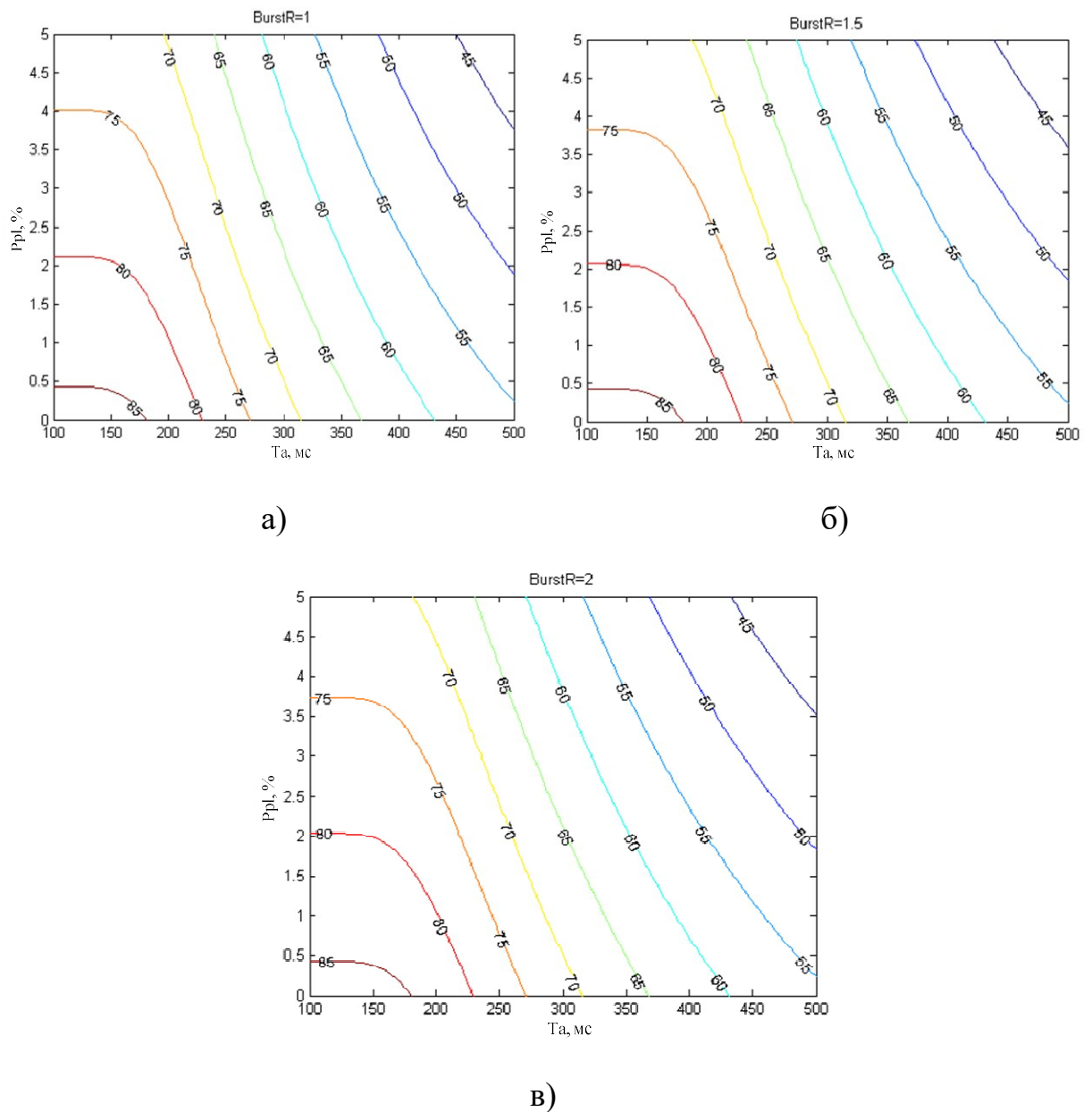


Рисунок 3.5 – Залежність якості передачі від ймовірності втрати пакета  $P_{pl}$  і значення абсолютної затримки  $T_a$  для кодека G.728 при  $\text{BurstR} = 1, 1.5, 2$

Коефіцієнт рейтингу для даного кодека в ідеальних умовах дорівнює 86,4. Кодек є стійким до втрат пакетів, в т.ч. і груповим, але збільшення значення абсолютної затримки сильно знижує якість мовлення.

Результати дослідження властивостей кодека наведені в таблиці 3.3. Також в таблиці наведені рекомендовані параметри мережі передачі для забезпечення

якості передачі мови  $R \geq 70$ . Значний були обрані для найгіршого випадку (групові втрати пакетів,  $BurstR = 2$ ) в середині допустимого інтервалу, що забезпечує можливість проведення гнучкого управління параметрами мережі.

Таблиця 3.3 – Властивості кодеків IP-телефонії і необхідні параметри мережі

| Кодек   | Швидкість передачі, кбит/с | max R | max доп. $T_a$ , мс | max доп. $P_{pl}$ , % |
|---------|----------------------------|-------|---------------------|-----------------------|
| G.711   | 64                         | 86.4  | 300                 | 1,7                   |
| G.726   | 32                         | 78.4  | 270                 | 3                     |
| G.729   | 8                          | 93.4  | 230                 | 2                     |
| G.723.1 | 6,4                        | 83.4  | 175                 | 1,7                   |
| G.728   | 16                         | 91.4  | 250                 | 2,5                   |

За допомогою отриманих даних, можна висунути загальні вимоги до мережі передачі для організації IP-телефонії з заданою якістю  $R \geq 70$  при використанні всіх основних кодеків. Для зручності дамо рішення даної задачі графічно (рис. 3.6 - 3.8). Заштрихована область являє собою множина допустимих рішень.

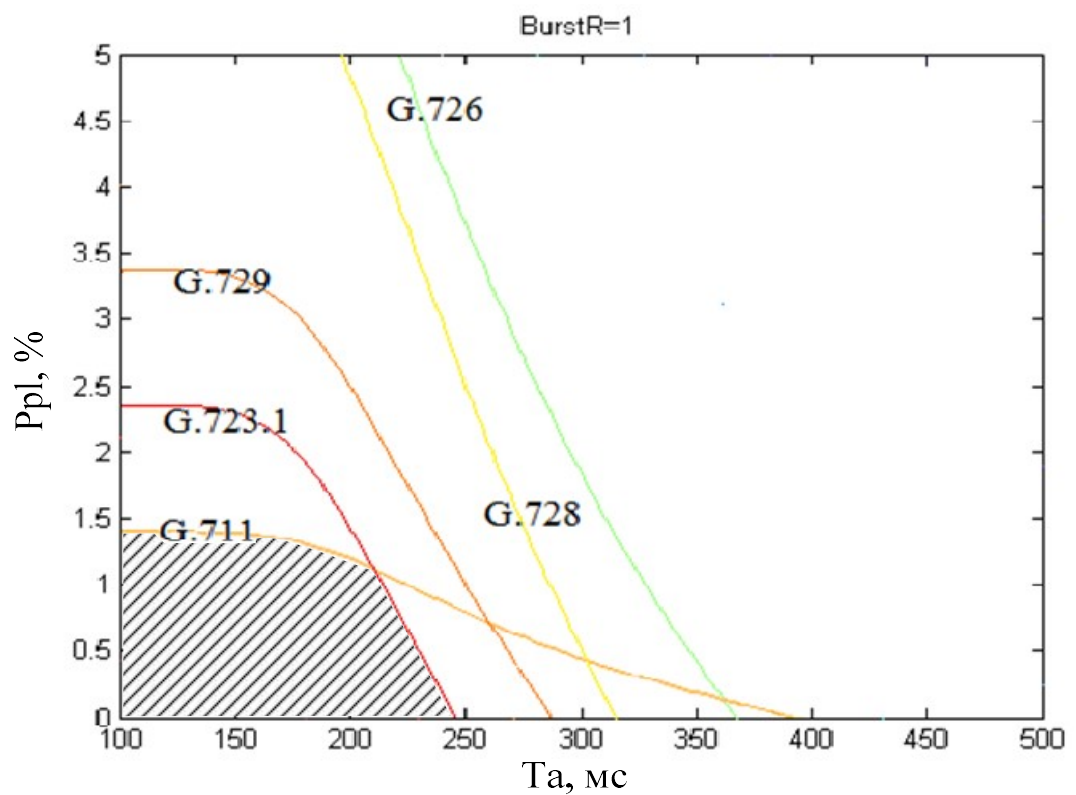


Рисунок 3.6 – Діапазон допустимих значень  $T_a$  і  $P_{pl}$  для  $R \geq 70$  при  $BurstR=1$

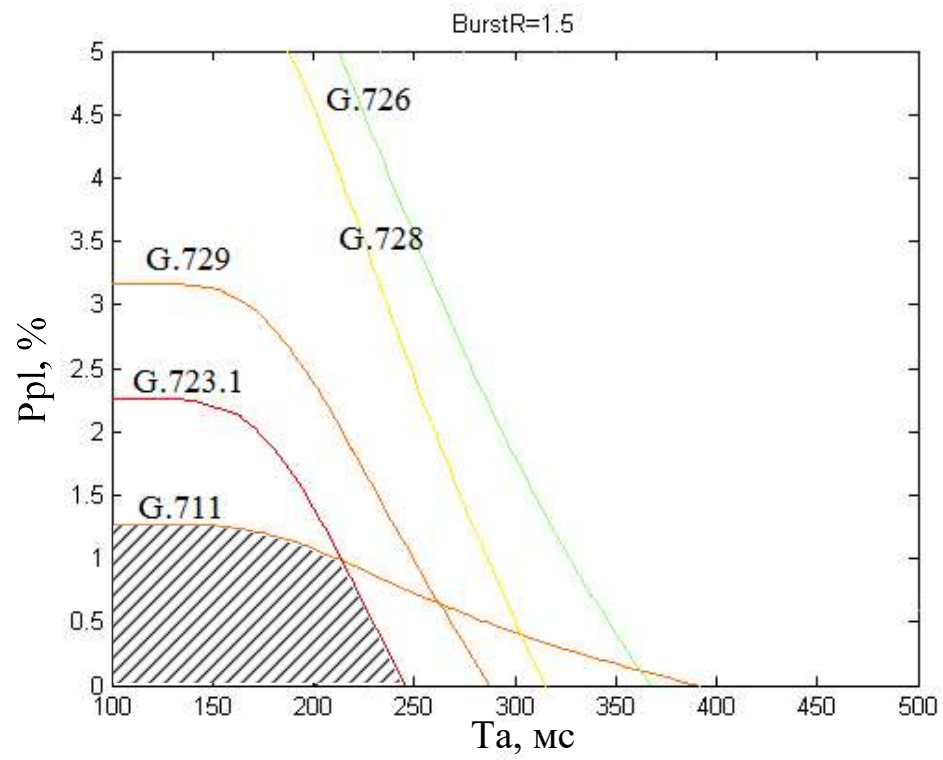


Рисунок 3.7– Діапазон допустимих значень  $T_a$  и  $P_{pl}$  для  $R \geq 70$  при  $BurstR = 1.5$

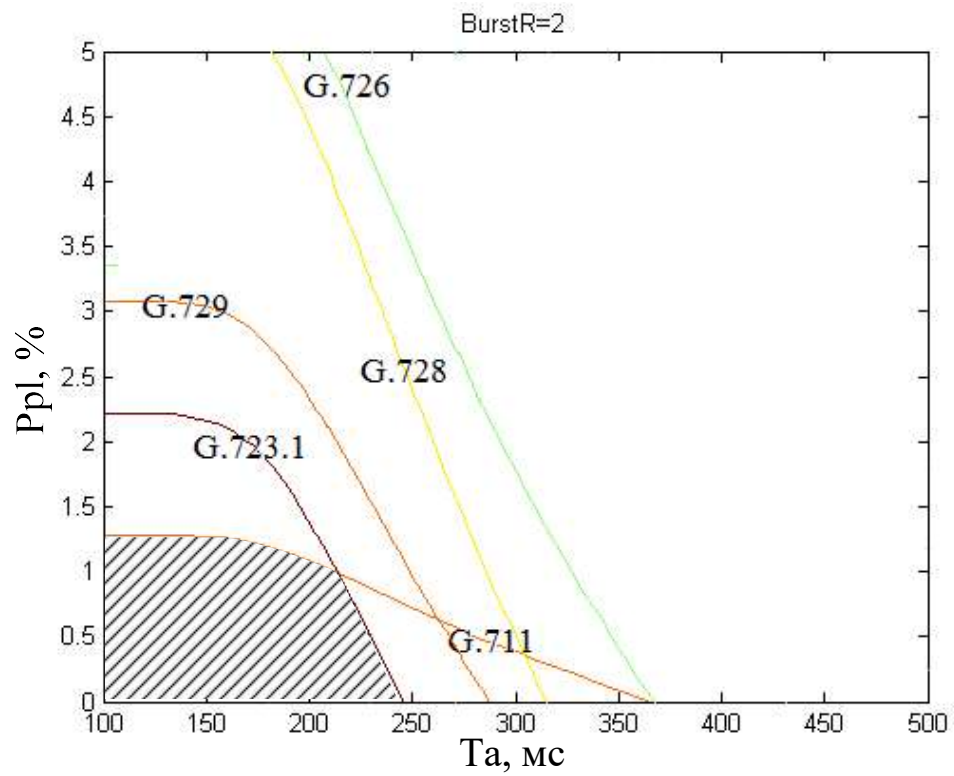


Рисунок 3.8 – Діапазон допустимих значень  $T_a$  и  $P_{pl}$  для  $R \geq 70$  при  $BurstR = 2$

Як видно з рисунків, обмежуючими факторами є:

- кодек G.711 (по допустимій ймовірності втрати пакетів);
- кодек G.723.1 (по максимально допустимій затримки);

Можна також зробити висновок, що в даному конкретному прикладі вплив характеру втрат слабо позначається на вирішенні, але в загальному випадку для визначення вимог до мережі необхідно керуватися даними для гіршого випадку, тобто для  $BurstR = 2$ .

Таким чином, для організації IP-телефонії з різнотипними кодеками необхідно забезпечити абсолютну затримку  $T_a$  менше 175 мс при максимально допустимій ймовірності втрати пакету  $P_{rl}$  в 0,013. Припустимо збільшення  $T_a$  до 240 мс при одночасному зменшенні ймовірності втрати пакета до нуля. У той же час ймовірність втрати пакета, що дорівнює 0,013 є граничною і перевищувати її не рекомендується навіть при мінімальних значеннях  $T_a$ .

На основі аналізу впливу основних параметрів кодеків на якість передачі мови можна зробити наступні висновки. Основні кодеки для IP-телефонії характеризуються сукупністю антагоністичних (конфліктуючих) між собою показників якості. Вплив показників якості кодеків на якість мови по-різному. При зміні вимог до якості мови необхідно міняти ступінь впливу показників кодека на якість мови. Для вибору одного кращого варіанту необхідно формувати умовні переваги із залученням додаткової інформації від експертів і її обробки на основі теорії корисності.

### 3.1.2 Вибір кращого варіанту кодека за допомогою евристичної процедури багатокритеріальної оптимізації

Нехай є множина (і) варіантів мережі зв'язку  $V_i$ . Якість кожного  $i$ -го варіанту оцінюються показниками:  $C_i = [C_{i1} \dots \dots C_{im}]$ .

Всі показники множини (I) є оптимальними. Потрібно визначити варіант з множини ( $I^*$ ), що відповідає максимуму  $C_i$  в виразі (3.1), при якому забезпечуються задовільні з точки зору ЛПР значення всіх  $m$  показників  $C_{ij} (j = 1, m)$  та кращий компроміс між ними з урахуванням властивостей множини (I) і апріорною інформацією про співвідношення важливості показників.

Нижче наведено основна процедура пошуку рішення.

1. Досліджується множина (1). Проводиться послідовна оптимізація по кожному з показників. Отримані максимуми по кожному з показників утворюють вектор  $Z_1$

$$Z_1 = \begin{pmatrix} \max C_{i1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \max C_{im} \end{pmatrix}, i \in \{I\}$$

2. Проводиться оптимізація за сумарним критерієм. Отриманий варіант  $I \in \{I\}$  характеризується вектором, компонентами якого є значення показників:

$$Y_1 = \begin{pmatrix} C_{1i} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \max C_{1n} \end{pmatrix}$$

3. Перед програмою ставиться питання: «Всі показники повинні задовільнити значення?» При відповіді на це питання для порівняльної оцінки використовується вектор максимумів показників  $Z_1$  [12]. У разі позитивної відповіді рішення є остаточним і  $Y_1$ - шуканий результат. У разі негативної відповіді програма виділяє виконуваний показник  $j$  має найменш задовільний значення, а також вказує величину  $K_j$ , таку, що при  $C_{ij} \geq K_j$  та  $V_i \in \{I\}$  значення показника  $j$  вважається задовільним.

4. Визначається нова множина:  $\{I^*\} \in \{I\}$ ,  $V_i \in \{I^*\}$ ,  $C_{ij} \geq K_j$ . В множині  $\{I^*\}$  повторюється крок 1, в результаті чого знаходиться вектор  $Z_2$ .

5. Перед програмою ставиться питання: «Чи припустимо зменшення максимально можливих значень окремих показників, що виникає при переході від вектора  $Z_1$  до вектору  $Z_2$ ?» У разі негативної відповіді змінюють значення  $K_j$  прийняте раніше в якості задовільного, визначають нове значення  $K_j < K_j$ . Далі повторюються всі етапи, починаючи з п.4. Даний етап процедури призводить до вибору компромісного значення  $K_j$ , на наступних етапах залишається незмінним.

6. Для множини  $\{I^*\}$  проводиться оптимізація за сумарним критерієм, який призводить до визначення вектора  $Y_2$  і т.д. Процедура закінчується тоді, коли в результаті питання по п. 3 отримано позитивну відповідь.

Вхідні дані містяться в трьох файлах: "in.dan", "tab.dan" і "vec.dan".

У файлі "in.dan", задається число критеріїв і число варіантів системи, яка оптимізується, а також міститься інформація про критерії та їх характеристики.

Файл "tab.dan" - таблиця порівняльної важливості, містить інформацію про порівняльної важливості критеріїв, обрану згідно міркувань експертів. Таблиця є квадратною матрицею  $A[n \dots n]$ , кожен елемент якої  $a_{ij}$  містить число, яке вказує ступінь важливості  $i$ -го критерія відносно  $j$ -го. Якщо критерій  $i$  важливіший, ніж критерій  $j$ , то  $a_{ij} > 1$ , в іншому випадку  $a_{ij} = 1$ .

У файлі "vec.dan" містяться значення приватних критеріїв по кожному з варіантів.

Опис окремих критеріїв наведено в таблиці 3.4. З таблиці видно, що показники якості кодека, обрані в якості окремих критеріїв, пов'язані між собою і мають носять конкуруючий характер - вони конфліктують між собою. При переході від одного мовленнєвого кодека до іншого поліпшення одного показника якості відповідає погіршенню іншого показника якості. Видно, що затримка збільшується зі збільшенням розміру кадру, а також зі збільшенням складності алгоритму кодування.

Розмір кадру впливає на якість відтворної мови, чим довше кадр, тим болев ефективно кодується мова. З іншого боку, зі збільшенням довжини кадру збільшується вплив затримки на обробку інформації, що передається.

Таблиця 3.4 – Опис окремих критеріїв

| Вхідні дані             |
|-------------------------|
| Число критеріїв $m = 4$ |
| Число векторів $n = 5$  |
| Швидкість передачі      |
| R-фактор                |
| Розмір кадра            |

Продовження таблиці 3.4

| Затримка                 |                |      |
|--------------------------|----------------|------|
| ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИТЕРІЇВ |                |      |
| Номер критерію           | Вид екстремума | Вага |
| 1                        | max            | 0.4  |
| 2                        | max            | 0.25 |
| 3                        | max            | 0.15 |
| 4                        | min            | 0.2  |

Вирішення завдання вибору кодека проводилося при різних значеннях коефіцієнтів важливості критеріїв згідно описаного алгоритму програми. Протоколи рішення задачі наведені в Додатку Б.

На основі розрахунків, наведених в попередньому розділі, в таблиці 3.5 приведені варіанти вибору кодека і значення окремих критеріїв.

Таблиця 3.5 – Варіанти вибору кодека і значення окремих критеріїв

| Кодек   | Швидкіс<br>ть<br>передачі,<br>кбіт/с | Параметр якості<br>передачі<br>R-фактор<br>[0; 100] | Розмір<br>кадру<br>мс | Затримка<br>мс |
|---------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| G.711   | 64                                   | 86,4                                                | 0,125                 | 60             |
| G.726   | 32                                   | 78,4                                                | 0,125                 | 30             |
| G.729   | 8                                    | 93,4                                                | 10                    | 35             |
| G.723.1 | 6,4                                  | 83,4                                                | 30                    | 37,5           |
| G.728   | 16                                   | 91,4                                                | 0,625                 | 30             |

В результаті оптимізації був обран варіант № 1, тобто кодек G.711 з параметрами: швидкість передачі 64 кбіт/с, R-фактор 86.4, розмір кадру 0.125 мс, затримка 60 мс.

### 3.2 Вибір оптимальних маршрутів у мультисервісних мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості

В даний час запропоновано множина підходів до формалізації та вирішення завдань багатоколіїної маршрутизації, [18] заснованих на використанні різних математичних моделей і алгоритмів рішення в залежності від обраного критерію оптимізації. Виділяють два класи алгоритмів пошуку шляхів: статичні і динамічні (адаптивні) алгоритми. Різниця полягає в ступені обліку зміни топології і навантаження мережі при вирішенні завдання вибору маршруту. Статична маршрутизація передбачає знаходження декількох шляхів між кожною парою джерело-одержувач заздалегідь. Дані маршрути записуються в таблицю маршрутизації і використовуються при передачі даних. Такі алгоритми дозволяють враховувати кілька критеріїв при виборі маршруту, але володіють великою обчислювальною складністю, отже, меншою гнучкістю при зміні навантаження в мережі. Такі алгоритми використовуються в надійних мережах, де зміни відбуваються рідко.

Динамічні протоколи засновані на лавинних алгоритмах маршрутизації і алгоритмах маршрутизації від джерела і здатні динамічно реагувати на зміни топології мережі.

Важливим фактором при виборі методу маршрутизації є логічна топологія мережі. Вдалим вибором є графові моделі і використання алгоритмів пошуку найкоротших шляхів. Вони статичні і забезпечують попереднє резервування каналів. В основу графових алгоритмів покладено математичний опис телекомунікаційних мереж у вигляді орієнтованого або неорієнтованого графа з подальшим використанням комбінаторних алгоритмів пошуку множини найкоротших шляхів між заданими парами вузлів (вершин) мережі. Зазвичай використовуються класичні алгоритми Дійкстри, Беллмана - Форда, і інших для пошуку найкоротших маршрутів.

Шляхи можуть перетинатися, тобто мати загальні вузли або канали, або бути непересічними і проходити по абсолютно різних каналах. Достатнім вважається знаходження двох або декількох непересічних шляхів. Недоліком графових моделей є те, що вони не враховують тип трафіку, що проходить по каналах.

Другий метод - це поточкові моделі. Вони, в свою чергу, одночасно з розрахунком множини шуканих шляхів формалізують рішення задачі розподілу трафіку користувачів по цих шляхах.

Існують також алгоритми, в яких виділяється додатковий резервний канал. Він може бути використаний спільно з іншою групою шляхів або відноситься до однієї групи,

що дозволяє управляти коефіцієнтом готовності шляху для забезпечення необхідних гарантій якості обслуговування. Однак основною перевагою багатоколіїної маршрутизації є відсутність резерву і використання всіх шляхів з оптимальним розподілом навантаження (балансування) по ним. У таких алгоритмах обрані шляхи забезпечують саморезервування і не вимагають додаткових ресурсів.

Балансування навантаження передбачає розрахунок деяких метрик і в разі відмови одного або декількох шляхів ці метрики враховуються при перерозподілі трафіку з відмовив шляху. Зазвичай використовується одна метрика (критерій), якій повинні задовольняти знайдені шляхи.

Багатокритеріальність враховує відразу кілька параметрів при розподілі навантаження і пошуку оптимальних шляхів. Це забезпечує більшу гнучкість, в плані задоволення вимог якості обслуговування, але при цьому зростає складність алгоритму і час розрахунку маршруту.

Для вибору оптимальних маршрутів пропонується алгоритм визначення множин шляхів на основі багатокритеріальної оптимізації. Структурна схема алгоритму представлена на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 — Алгоритм оптимальної багатоколіїної маршрутизації

На першому етапі будується граф мережі [19]. Сусідні маршрутизатори обмінюються маршрутною інформацією, що дозволяє отримати цілісну топологію мережі, в якій відображені всі зв'язки в мережі. З кожним каналом пов'язані кілька параметрів - доступна для резервування пропускна здатність, адміністративний вагу і атрибути каналу. На побудованому графі проводиться пошук множини найкоротших шляхів між кінцевими вузлами тунелю з використанням алгоритму Дійкстри. Для

знаходження множини незалежних найкоротших шляхів між будь-якою парою вузлів можна використовувати граф або структурну матрицю мережі. При цьому структурна матриця послідовно зводиться в квадрат, куб і т.д. до тих пір, поки матриця не перестане змінюватися, тобто стане характеристичною. Для знаходження шляхів рангу більш  $r$ , матрицю слід зводити до  $r$ -го ступеня. Можна показати, що в гіршому випадку, коли  $r = n-1$ , обчислювальна складність такого алгоритму буде оцінюватися величиною  $O(N^r)$ , де  $N$  - розмірність матриці. Для випадку повно-мережі, обчислювальна складність запропонованої процедури пошуку незалежних найкоротших шляхів на основі алгоритму Діjkстри буде оцінюватися величиною  $O(N^3)$ , що істотно скорочує час вирішення завдання.

В якості первинного параметра для розрахунку найкоротшого шляху, використовувалася вартість, яка може бути як функцією одного аргументу, наприклад затримки, так і декількох параметрів.

$$\text{Cost} = (K1 \cdot Bw + \frac{K2 \cdot Bw}{256 - Ld} + K3 \cdot Dl) \cdot \frac{K5}{Rl + K4}, \quad (3.31)$$

де  $Bw$  - пропускна здатність шляху,  $Ld$  - завантаження шляху,  $Dl$  - затримка шляху,  $Rl$  - надійність шляху. Таким чином, найкоротші шляхи вибиралися по мінімуму вартості пересилання по шляху  $ij$ .

При розрахунку вартісної метрики на підставі затримки слід враховувати, що сумарна затримка складається з декількох складових і в загальному випадку визначається виразом:

$$T_{\Sigma} = T_s + T_q + T_t, \quad (3.32)$$

де  $T_s$  - сумарний час комутації пакета,  $T_q$  - сумарний час очікування пакета даних в черзі,  $T_t$  - сумарний час передачі пакета по каналу зв'язку.

Час комутації пакета, визначається як сума затримок у всіх проміжних вузлах, між моментом прийому пакета і постановку його в чергу на передачу:

$$T_s = \sum_{i=1}^j t_{si}, \quad (3.33)$$

де  $j$  - число проміжних вузлів в дорозі,  $t_{si}$  - час комутації пакета в  $i$ -му вузлі.

Сумарний час очікування пакета в черзі, визначається як сума затримок у всіх

проміжних вузлах між моментом, коли пакет був поставлений в чергу і моментом, коли він починає передаватися:

$$T_q = \sum_{i=1}^j t_{qi} , \quad (3.34)$$

де  $j$  - число проміжних вузлів в дорозі,  $t_{qi}$  - час очікування в черзі пакета в  $i$ -му вузлі.

Сумарний час передачі пакета по шляху, визначається сумою затримок між передачею в канал останнього біта пакету на вході і прийомом цього біта на виході каналу:

$$T_q = \sum_{i=1}^j t_{ti} , \quad (3.35)$$

де  $j$  — число проміжних вузлів в дорозі,  $t_{ti}$  — час передачі пакета по каналу ( $i, i + l$ ).

На практиці, наведені аналітичні вирази (3.33) - (3.35) для визначення затримки використовувати складно з ряду причин. По-перше величина затримки  $t_0$  визначається поточного завантаження маршрутизатора практично не передбачувана в разі перевантаження в мережі. [20] По-друге, в залежності від середовища передачі і відстані між вузлами величина  $t_{ti}$  може значно варіюватися. Наприклад, при використанні супутникових каналів зв'язку затримка пакетів може досягати 500-700мс. Тому на практиці існує кілька способів для емпіричної оцінки затримки:

- пересилання тестових пакетів з часовою міткою і отримання відповіді;
- синхронізація джерела і одержувача (наприклад, за допомогою NTP) і обмін тестовими пакетами ;
- використання фірмових технологій, таких як Cisco Service Assurance Agent.

Перший спосіб дозволяє орієнтовно визначити величину затримки, шляхом періодичної пересилання тестових пакетів до одержувача і відповідей одержувача. Даний спосіб визначає різницю між часом відправлення пакета  $t_1$ , і отриманням відповіді  $t_2$ , що по суті є двосторонньою затримкою (рис. 3.2), тоді

$$T_{\Sigma} = \frac{t_2 - t_1}{2} . \quad (3.36)$$

В результаті рекурсивного виконання алгоритму Дейкстри на графі знаходиться множина незалежних найкоротших шляхів, яку можна використовувати для розподілу навантаження. Щоб домогтися рівномірного навантаження, необхідно вибрати таку силу-

силенню найкоротших шляхів (підмережа), яке б дозволяло максимізувати сумарний потік, який можна передати через дану мережу. З отриманого множини незалежних найкоротших шляхів необхідно сформувати множину рішень, які будуть представляти собою всі можливі впорядковані підмножини, тобто кожна підмножина буде являти собою підмережа (мультіпуті) з 2-х, 3-х, і т.д. незалежних найкоротших шляхів. Кожен шлях з отриманого множини характеризується двома критеріями - величиною максимального потоку, який можна передати по даному шляху і кількістю вузлів складових даних шлях. Максимальний потік кожного мультіпуті, відповідно до теореми Форда-Фалкерсона визначається мінімальним розрізом даного мультіпуті тобто.

$$\max X_{ij} = \sum \min\{x_{ln} | l, n \in M\}, \quad (3.37)$$

де  $X_{ij}$  - потік по мультіпуті  $ij$ ,  $x_{ln}$  - мінімальна пропускна здатність незалежного шляху,  $l, n$  - суміжні вузли на мультіпуті  $ij$ ,  $M$  - множина вузлів, складових мультіпуті  $ij$ . Отримане множина маршрутів дозволяє максимізувати сумарний потік, який можна передати і домогтися рівномірного завантаження мережі.

Іншою важливою мережевою характеристикою, є затримка пакетів. У ряді робіт показано, що основна складова затримки визначається часом обробки пакета в вузлі  $t_q$ , а також при великій відстані між вузлами (тисячі кілометрів) - затримка поширення  $t_q$ . Результати експериментальних досліджень показують справедливості цього твердження. Отже, величина затримки буде рости зі збільшенням кількості вузлів, через які проходить пакет, і буде зростати в міру збільшення довжини шляху. Даний параметр входить в вартісну метрику і повинен використовуватися як один з параметрів при знаходженні множини незалежних найкоротших шляхів.

Таким чином, для визначення оптимального числа шляхів необхідно узгодити два суперечливих умови - з одного боку максимізувати сумарний потік, який передається по мережі, з іншого - мінімізувати вартість. Завдання вибору ефективного рішення в цих умовах відома як проблема багатокритеріальної оптимізації, яка полягає у виборі компромісного рішення і вимагає обґрунтування принципу компромісу. Завдання вибору оптимального рішення в многокритеріальній ситуації, не залежно від вибору критерію, полягає в ранжируванні можливих рішень по множини окремих локальних критеріїв. У загальному випадку вона може бути сформульована таким чином, нехай  $x$  - рішення, певне, на множини допустимих рішень  $X$ . Якість рішення оцінюється безліччю критеріїв  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ . відомо відображення  $f : x \rightarrow K$ , і відносна важливість

критеріїв  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ . Необхідно знайти оптимальне рішення

$$x^\circ = \text{optG}[K(x), \Lambda], \quad (3.38)$$

де  $x^\circ$  - ефективне рішення,  $\text{optG}[K(x), \Lambda]$  - схема компромісу (узагальнений критерій оцінки ефективності).

Рішення поставленого завдання не викликає ускладнень в тому випадку, якщо відомий вектор  $\Lambda$  і визначено вид оператора  $\text{optG}[\cdot]$ . Один з підходів до вирішення завдання, заснований на зведенні багатокритеріальної задачі до однокритерійним. Теоретичною основою такого підходу є теорія корисності, згідно з якою передбачається, що існує деяка узагальнена оцінка будь-якого рішення  $x \in X$ . Для вирішення завдання необхідно обґрунтувати вид функції корисності локальних критеріїв  $\xi_i(k_i)$ .

Необхідно, щоб функція корисності окремих критеріїв була універсальною і добре пристосованою для врахування особливостей мереж з мультипротоковою комутацією міток. Для цього вона повинна відповідати таким вимогам:

- мати єдиний інтервал рішення  $[0,1]$ ;
- бути інваріантним до виду екстремуму окремого критерію (*min* чи *max*) тобто найкращому значенню має відповідати значення 1, а найгіршим – 0;

Цим вимогам відповідає функція виду:

$$\xi_i(K_i) = \left( \frac{K_i - K_{\text{інх}}}{K_{\text{інл}} - K_{\text{інх}}} \right)^{\alpha_i}, \quad (3.39)$$

де  $K_i$  - значення  $i$ -го окремого критерію для варіанту системи;  $K_{\text{інл}}$ ,  $K_{\text{інх}}$  - його найкраще і найгірше значення, відповідне або кордонів області допустимого зміни відповідних параметрів системи, або програм наближеною області компромісів;  $\alpha_i$  - показник нелінійності. При 1 отримуємо лінійну, при  $0 < \alpha_i < 1$  - вогнуту, при  $\alpha_i > 1$  - випуклу залежність. При цьому кривизна залежить від  $\alpha_i$ .

З огляду на, що час проектування будь-якої телекомунікаційної системи мало в порівнянні з еволюційним циклом, використовуючи апроксимацію так званої S-подібної кривої (рис. 3.10), виберемо  $\alpha_i = 1$ .

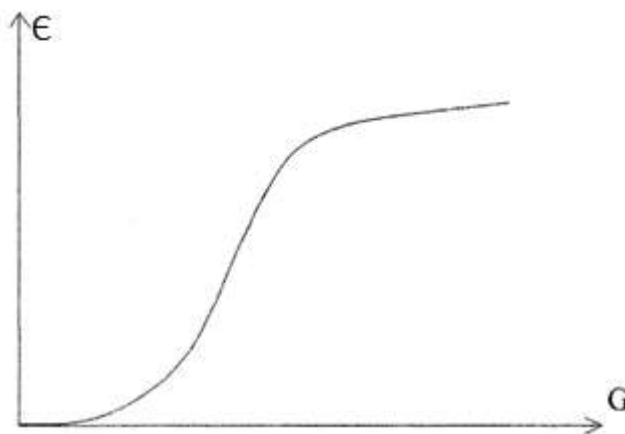


Рисунок 3.10 — S-подібна крива залежності ефекту системи  $E$  від вкладеного ресурсу.

Для визначення межі наближеної області компромісів  $X^p$ , т.е. значень  $K_{min}$  и  $K_{max}$  користуються таким методом. На множини допустимих рішень  $X$  проводять оптимізацію по кожному з окремих критеріїв  $K_i$ , в результаті визначається екстремальне за даним критерієм рішення:

$$X_m^0 = \arg \text{extr } K_m(x), m = \overline{1, n}, \quad (3.40)$$

та відповідні йому значення всіх окремих критеріїв,  $l = \overline{1, n}; l \neq m$ . Тоді,  $K_{mnl} = K_m(X_m^0)$ , де:

$$K_{mnl} = \begin{cases} \max_j K_m(x_j^0), K_m(x) \rightarrow \min; \\ \min_j K_m(x_j^0), K_m(x) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (3.41)$$

Вид глобального критерію якості істотно залежить від типу розв'язуваної задачі. У цьому завданні глобальне якість альтернативи можна описати сумою локальних якостей. В результаті обчислень максимум узагальненого коефіцієнта буде визначати деякий набір шляхів, при використанні яких досягається оптимізація за заданими критеріями.

$$K_m = \begin{cases} \min(\max(C_{ij})); \\ \max(\sum_1^n \min(X_{ij})). \end{cases} \quad (3.42)$$

де  $C_{ij}$  - вартість (затримка) пересилання по шляху  $ij$ ,  $X_{ij}$  - максимальний потік, який визначається виразом (3.33) для шляху  $ij$ ,  $n$  - число незалежних шляхів в заданій мережі.

З урахуванням прийнятої функції корисності як узагальненого критерію оцінки ефективності можна використовувати наступний критерій:

$$\text{optG}[K(x), \Lambda] = \max\{\sum_{i=1}^n \xi_i(k_i) \cdot \lambda_i\}, \quad (3.43)$$

де  $i \in [1, 2]$  – номер окремого критерія,  $\lambda_i \in [0, 1]$  – важливість  $i$ -го критерія, така, що  $\sum \lambda_i = 1$ .

Пропонований алгоритм був апробований на декількох мережах, модельованих графом розміром 30, 50 і 100 вузлів. Для кожного графа пошук оптимального шляху складався з трьох дій:

- знаходження множини найкоротших шляхів з використанням алгоритму Дейкстри;
- визначення максимального потоку для кожного з найкоротших шляхів за виразом (3.31);
- вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації для множини найкоротших шляхів;

На рис. 3.11-3.13 приведені криві для графів розміром 30, 50 і 100 вузлів відповідно. З рисунків видно, що для кожного з наведених графів існує максимум, що визначає множину оптимальних шляхів. По осі  $x$  відкладено число незалежних найкоротших шляхів. По осі  $y$  – значення узагальненого показника. У проведеному експерименті ваги  $p$ , окремих критеріїв приймалися рівними 0.5.

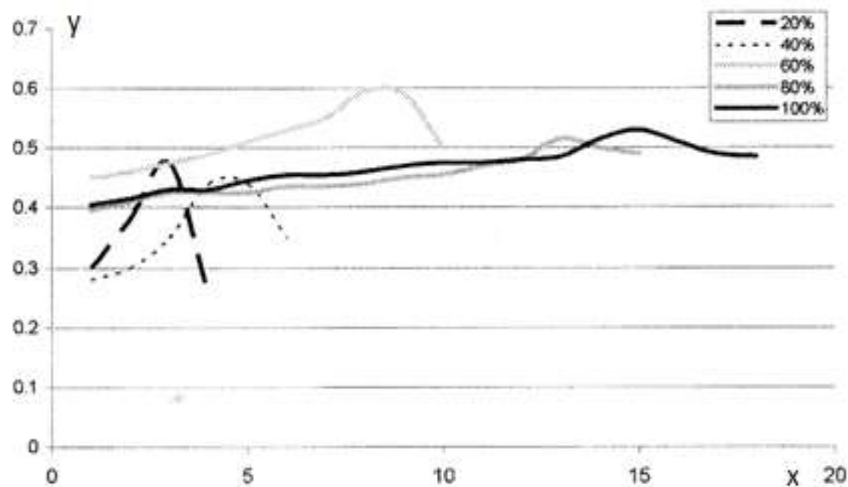


Рисунок 3.11 - Рішення задачі багатокритеріальної оптимізації для графа розмірністю 30 вузлів

Для кожного з розглянутих графів, завдання оптимізації вирішувалася при різних зв'язності. У кожному експерименті зв'язність мережі змінювалася від 10% (крім графа з 30 вузлів) до 100% щодо кількості вузлів в мережі, тобто наприклад якщо заданий граф, що складається з 50 вузлів зв'язність 40%, то існує 20 шляхів від вузла  $i$  до вузла  $j$ .

Не дивлячись на те, що зв'язність визначає кількість шляхів між кінцевими вузлами, з аналізу кривих видно, що оптимальне число шляхів не залежить від зв'язності і визначається виразом

$$M_{\text{опт}} = \tau \cdot M, \quad (3.44)$$

де  $M$  - множина незалежних найкоротших шляхів,  $\tau$  - коефіцієнт, отриманий в результаті рішення задачі багатокритеріальної оптимізації для даного графа.

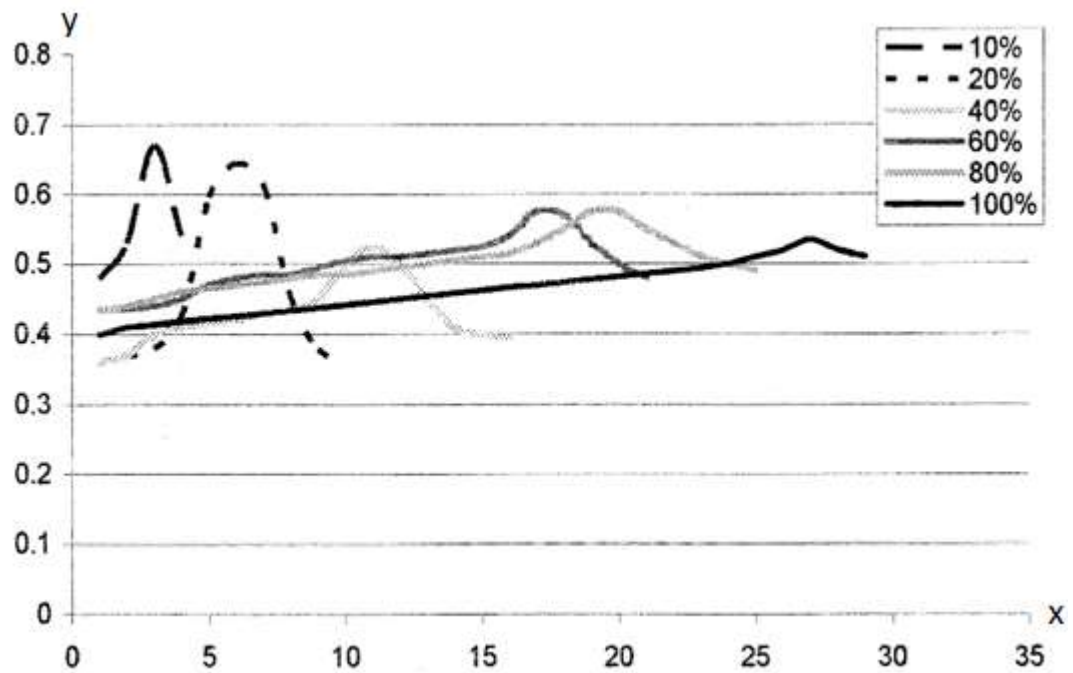


Рисунок 3.12 — Рішення задачі багатокритеріальної оптимізації для графа розмірністю 50 вузлів

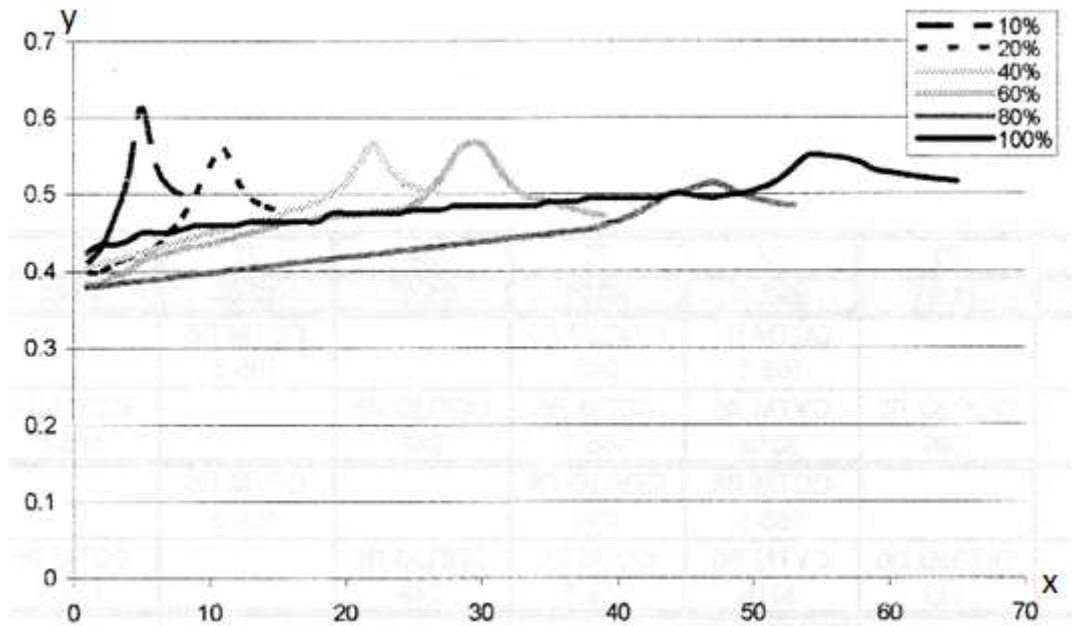


Рисунок 3.13 — Рішення задачі багатокритеріальної оптимізації для графа розмірністю 100 вузлів

В ході моделювання емпіричним шляхом вдалося встановити, що значення коефіцієнта лежить в діапазоні  $\tau = \{0.5, 0.7\}$ . І не залежить від розміру і зв'язності графа.

Розроблений алгоритм багатокошляхової маршрутизації дозволяє визначити оптимальне число незалежних найкоротших шляхів, що дає можливість оптимізувати використання ресурсів в мережах, побудованих з використанням технології MPLS-TE. Запропонований алгоритм включає в себе процедуру багатокритеріальної оптимізації. Як окремі критерії використані величини максимального потоку по мультішляху і затримки. При необхідності, набір окремих критеріїв може бути розширено. Це дозволяє вирішувати задачу забезпечення необхідної якості обслуговування.

## ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі проведено дослідження багатокритеріального підходу до вибору параметрів елементів інфокомунікаційної мережі.

Проведено аналіз деяких задач оптимізації в телекомунікаціях і виділені особливості таких завдань. Телекомунікаційні системи є складними системами і при проектуванні телекомунікаційних систем виникає необхідність вибору кращого варіанту з деякої допустимої множини варіантів засобів телекомунікації з урахуванням сукупності суперечливих техніко-економічних вимог, які характеризуються значеннями відповідних показників якості. Це визначає необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації при виборі бажаних рішень з множини допустимих варіантів.

Проведено огляд найбільш використовуваних методів вирішення задач багатокритеріальної оптимізації. Велика кількість чисельних методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації засновано на виборі певної точки з множини Парето, що еквівалентно вказівкою ваг для кожного з окремих критеріїв оптимальності. Для вибору одного кращого варіанту необхідно формувати умовні переваги із залученням додаткової інформації від експертів і її обробки на основі теорії корисності. В роботі запропоновано використовувати евристичну процедуру уточнення рішення з залученням ЛПР.

У роботі сформульовані і вирішені дві задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням запропонованої евристичної процедури: задача вибору кодека для IP-телефонії та завдання вибору множини маршрутів для організації багатошляхової маршрутизації в мережі. У кожному завданні обґрунтований вибір множини окремих критеріїв оптимізації, визначені значення окремих критеріїв для кожного варіанту рішення, отримано оптимальне рішення при різних значеннях ваг окремих критеріїв. Рішення уточнювалися ЛПР в інтерактивному режимі.

Дослідження вирішення зазначених завдань багатокритеріальної оптимізації показало, що використання запропонованої евристичної процедури для уточнення рішення з залучення ЛПР дозволяє на відміну від чисельних методів в динаміці змінювати пріоритети окремих критеріїв і їх значення з метою досягнення необхідної якості функціонування телекомунікаційної системи.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Безрук В.М. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций: монография / В.М. Безрук, Д.В. Чеботарева, Ю.В. Скорик. – Харьков: ФОП Коряк С.Ф., 2017. – С. 42 –91.
2. Ногин В. Д. Проблема сужения множества Парето / В. Д. Ногин. – Санкт-Петербург: Искусственный интеллект и принятие решений, 2008. – С. 98 –112.
3. Зюко А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, И.П. Панфилов, В.Л. Банкет, П.В. Иващенко. – М.: Радио и связь, 1985. – 272 с.
4. Шнепс М. А. Системы распределения информации. Методы расчета. / М. А. Шнепс. – М: Связь, 1979. – 66 с.
5. Бухаров А. С. Моделирование файлообмена в пиринговых сетях / А. С. Бухаров, Р. А. Тарасов. // VI международная научно-техническая конференция "Информатика, управление и искусственный интеллект (ИУИИ-2019)». – 2019. – С. 56 –57.
6. Безрук В.М. Методы многокритериальной оптимизации в задачах проектирования телекоммуникационных систем / В.М. Безрук, О.А. Колесников, И.В. Свид, И.В. Корсун. – Львів: Комп'ютерні технології друкарства, 2006. – С. 166 – 190.
7. Безрук В.М. Многокритериальный подход к маршрутизации в сетях связи / В.М. Безрук, В.В. Варич // Радиотехника. –Харьков, 2010. – Вып. – С. 45–48.
8. Безрук В.М. Многокритериальный выбор предпочтительных вариантов средств телекоммуникаций методом анализа иерархий / В.М. Безрук, Ю.В. Скорик, М.Н. Климаш // – Проблеми інформатики та моделювання: П'ятнадцята міжнародна науково-технічна конференція. — Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – С. 20.
9. Турупалов В.В. Метод удосконалення структури транспортної телекомунікаційної мережі на основі багатокритеріальної оптимізації / Л.О. Шебанова, В.В. Турупалов, // – Автоматика, телемеханіка, зв'язок. Збірник наукових праць ДонІЗТ. — 2006. – № 25. – С. 5–9.
10. Поповський В. В. Методи наукових досліджень в телекомунікаціях. / В. В. Поповський. – Харьков: СМІТ, 2013. – С. 215 – 225. – (2).

11. Поповський В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем. / В. В. Поповський. – Харків: СМІТ, 2011. – 330 с.
12. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / пер. с англ. / Р. Штойер. – М: Радио и связь, 1992. – 504 с.
13. Обеспечение качества IP-телефонии [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа до ресурсу : [http://voip.jalita.com/literature/book\\_1/5.shtml](http://voip.jalita.com/literature/book_1/5.shtml)
14. Е-модель – описание [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа до ресурсу : <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-200904-I/en->
15. Петров Э. Г. Территориально распределенные системы обслуживания/ Э.Г. Петров В.П. Пискланова, В.В. Бескоровайный. – К.: Техніка,1992. – 420 с.
16. Гольдштейн Б. С. IP – телефонія/Б. С. Гольдштейн, А. В. Пинчук, А. Л. Суховицкий. – М. : Радио и связь, 2001. — 336 с.
17. Бухаров А. С. Использование многокритериального подхода к оптимизации ТКС / А. С. Бухаров, В. А. Барсук, Н. В. Кривошапка. // XXIV международный молодёжный форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке». – 2020. – №10. – С. 47–48.
18. Анализ перспектив применения математического аппарата многокритериального анализа к задаче автоматической маршрутизации в телекоммуникационных сетях [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа до ресурсу : <http://www.pandia.ru/text/77/132/330.php>
19. Бухаров А. С. Оценка качества речи в телемедицинских сетях / А. С. Бухаров, Р. А. Тарасов. // V международная научнотехническая конференция «Информатика, управление и искусственный интеллект (ИУИИ – 2018)». – 2018. – №10. – С. 36.
20. Гоголева М. А. Классификация и анализ методов маршрутизации в MESH-Сетях / М. А. Гоголева. – Харьков: Радиотехника, 2010. – С. 173–185.