

В. М. Безрук, Д. В. Чеботарьова, Ю. В. Скорик
Харківський національний університет радіоелектроніки

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР РІШЕНЬ ПРИ ПЛАНУВАННІ ТА ПРОЕКТУВАННІ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

© Безрук В. М., Чеботарьова Д. В., Скорик Ю. В., 2019

Розглянуто практичні особливості застосування методології багатокритеріальної оптимізації під час розв'язування задач планування і проектування у різних типах мереж зв'язку, зокрема, стільниковій мережі зв'язку, мережі передавання даних, мультисервісній мережі зв'язку, ad-hoc мережі, бездротовій сенсорно-актуаторній мережі.

Ключові слова: планування, мережі зв'язку, багатокритеріальна оптимізація.

V. Bezruk, D. Chebotareva, Yu. Skorik
Kharkiv national university of radioelectronics

MULTIPLECRITERIA CHOICE OF DECISIONS FOR PLANNING AND DESIGN OF COMMUNICATION NETWORKS

© Bezruk V., Chebotareva D., Skorik Yu., 2019

This article examines the practical features of applying multicriteria optimization methodology for solving planning and design problems in various types of communication networks, in particular, cellular communication network, data network, multiservice communication network, ad-hoc network, wireless sensor– the actuarial network.

Ключові слова: planning, communication networks, multicriteria optimization.

Вступ

Сучасні мережі зв'язку, незалежно від їхньої організації й типу переданої інформації, стають усе складнішими й визначаються сукупністю техніко-економічних вимог, які оцінюються значеннями відповідних показників якості при їх створенні та експлуатації. В задачах планування і проектування мереж зв'язку існує деяка множина допустимих проектних рішень, і серед них необхідно вибирати оптимальні варіанти з урахуванням сукупності показників якості. При цьому актуальним є застосування методів багатокритеріальної оптимізації для вибору оптимальних проектних рішень [1–5].

У роботі [1] викладено методологію багатокритеріальної оптимізації для вибору оптимальних проектних рішень із урахуванням сукупності показників якості. Вона передбачає виконання таких проектних процедур: формування деякої множини допустимих проектних рішень, оцінювання проектних варіантів за сукупністю показників якості і представлення їх у критеріальному просторі їхніх оцінок, задання векторного критерію оптимальності, що враховує сукупність показників якості, а також вибір проектних варіантів, оптимальних за вибраним критерієм оптимальності. У випадку використання безумовного критерію переваги (БКП) оптимальним проектним варіантам відповідають Парето-оптимальні оцінки у критеріальному просторі. При знаходженні підмножини Парето-оптимальних проектних варіантів вилучають безумовно гірші проектні рішення. Отримані Парето-оптимальні проектні варіанти є незрівнянними між собою за БКП. З метою подальшого звуження підмножини Парето і вибору єдиного проектного варіанта для подальшої його практичної реалізації необхідно додатково вводити умовний критерій переваги (УКП) з використанням додаткової інформації від експертів про відношення переваги. Існує ряд формалізованих методів врахування цієї інформації при побудові формалізованої процедури, яка реалізує вибір єдиного проектного варіанта за УКП. Зокрема, це метод аналізу ієрархій, лексографічний метод, метод послідовних уступок, методи на основі теорії корисності та теорії розмитих множин.

Розглянуто практичні особливості застосування методології багатокритеріальної оптимізації при розв'язанні задач планування і проектування у різних типах мереж зв'язку, зокрема, стільниковій мережі зв'язку, мережі передавання даних, мультисервісній мережі зв'язку, ad-hoc мережі, бездротовій сенсорно-актуаторній мережі [2–6].

1. Багатокритеріальна оптимізація на етапі номінального планування стільникових мереж зв'язку

Розглянемо практичні особливості застосування методології багатокритеріальної оптимізації на етапі номінального планування стільникових мереж мобільного зв'язку (СМЗ) [2].

Знаходження оптимальних проектних варіантів СМЗ при номінальному плануванні СМЗ із урахуванням сукупності показників якості містить такі стадії:

- задання вихідної множини варіантів мережі, які відрізняються даними про територію, що обслуговується, виділену смугу частот, кількість абонентів тощо;
- виділення множини допустимих варіантів з урахуванням обмежень на структуру й параметри мережі, а також обмежень на значення показників якості;
- вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів мереж з використанням БКП;
- аналіз отриманих Парето-оптимальних варіантів мереж, оцінювання їх багатовимірних потенційних характеристик і багатовимірних діаграм обміну показників якості;
- вибір єдиного проектного варіанта мережі з підмножини Парето-оптимальних з використанням заданого УКП.

У розглянутому прикладі сформовано множину допустимих варіантів СМЗ, що визначалися різними даними щодо планованої кількості абонентів у мережі, розміру території, що обслуговується, активності абонентів, виділеної смуги частот, розміру кластерів, потужності передавачів базових станцій (БС), припустимій ймовірності блокування викликів, відсотку часу погіршення якості зв'язку.

При цьому розраховано такі технічні параметри СМЗ:

1. Загальна кількість частотних каналів, що виділяються для розгортання СМЗ

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (1)$$

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

2. Кількість радіочастот, необхідних для обслуговування абонентів в одному секторі кожного стільника

$$n_s = \text{int}(N_k / C \cdot M). \quad (2)$$

3. Величина припустимого телефонного навантаження в одному секторі одного стільника або в чарунці, яка визначається співвідношеннями

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_0} / 2 \right)^{1/n_0}} \right] \quad \text{при } P_{\text{бл}} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}; \quad (3)$$

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left(P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_0} / 2 \right)} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{при } P_{\text{бл}} > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (4)$$

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

4. Кількість абонентів, що обслуговуються БС, та яка залежить від кількості секторів, припустимого телефонного навантаження й активності абонентів

$$N_{\text{аБТС}} = M \text{int}(A / \beta). \quad (5)$$

5. Необхідна кількість БС на заданій території обслуговування

$$N_{\text{БТС}} = \text{int}(N_a / N_{\text{аБТС}}). \quad (6)$$

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

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{\text{БТС}}}}. \quad (7)$$

7. Величина захисної відстані між BTS з однаковими частотними каналами

$$D = R\sqrt{3C}. \quad (8)$$

8. Імовірність помилки в процесі сеансу зв'язку

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{(\sqrt{3C} - 1)^{2k}}. \quad (9)$$

9. Ефективність використання радіоспектра, що обумовлена кількістю активних абонентів, які припадають на одиницю смуги частот

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C} \quad (10)$$

У результаті розрахунків розроблено початковий (номінальний) частотно-територіальний план і сформовано множину допустимих варіантів СМЗ. У розглянутому прикладі номінального планування СМЗ обрано такі показники якості: k_1 – імовірність помилки передавання; k_2 – ємність мережі; k_3 – кількість базових станцій у мережі; k_4 – ефективність використання радіочастотного спектра; k_5 – імовірність блокування; k_6 – площа покриття. Для кожного проектного варіанта СМЗ знайдено оцінки значень вказаних показників якості; виконано їх нормування до максимальних значень і приведення до порівняльного вигляду. Знаходження підмножини оптимальних варіантів СМЗ виконано в критеріальному просторі V оцінок вектора введених показників якості $\vec{k} = (k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$.

Було сформовано вихідну множину із 100 варіантів побудови СМЗ. У критеріальному просторі V виділена підмножина Парето-оптимальних оцінок за бінарним відношенням нестрогої переваги $\geq P(V) = opt_{\geq} V$. Векторні оцінки до цієї підмножини $\vec{k}^0 \in P(V)$ вводили тоді і тільки тоді, коли не було інших векторних оцінок \vec{k} , для яких виконувалась би векторна нерівність $\vec{k} \geq \vec{k}^0$. Знайдений підмножині Парето-оптимальних оцінок відповідає підмножина Парето-оптимальних варіантів СМС.

Згідно з наведеною формалізованою процедурою вибору у розглянутому прикладі із 100 проектних варіантів СМС вибрано 71 Парето-оптимальний варіант побудови СМЗ. При цьому було відкинута 29 безумовно гірших за критерієм Парето варіантів побудови СМЗ.

Для отриманих Парето-оптимальних проектних варіантів характерні такі властивості:

1. Усі варіанти СМС, що не належать до множини Парето-оптимальних, є, безумовно, гіршими.
2. Жоден Парето-оптимальний варіант СМС не можна визнати безумовно гіршим або кращим порівняно з іншим варіантом цієї множини. Це означає, що всі вони є незрівнянними за БКП.
4. Кожному Парето-оптимальному варіанту СМС відповідає потенціально можливе значення кожного з показників якості (k_1, k_2, \dots, k_m) , чого можна досягти за фіксованих, але довільних значень інших $(m-1)$ показників якості. Це є властивість m -кратного узгодженого оптимуму. Сукупність таких оптимальних значень показників якості є багатовимірними потенціальними характеристиками СМЗ (БПХ).

Для вибору із знайденої підмножини Парето-оптимальних варіантів єдиного проектного варіанта СМЗ використано УКП у вигляді зваженої суми значень обраних показників якості

$$k_p = \sum_{i=1}^6 c_i k_i$$

За умови мінімуму k_p при $c_i = 1 \setminus 6$ із отриманої підмножини Парето-оптимальних

вибрано єдиний варіант побудови СМЗ, який характеризують такі дані: кількість абонентів у мережі – 30000; площа території, що обслуговується – 320 кв.км; активність абонентів – 0,025 Ерл; ширина смуги частот – 4 МГц; припустима ймовірність блокування виклику – 0,01; відсоток часу погіршення якості зв'язку – 0,07; щільність обслуговування – 94 акт. абон./кв. км; розмір кластера – 7; кількість базових станцій у мережі – 133; кількість абонентів, що обслуговується однією БС – 226; ефективність використання радіочастотного спектра – $1,614 \cdot 10^{-4}$ акт. абон./Гц; телефонне навантаження – 3,326 Ерл; імовірність помилки – $5,277 \cdot 10^{-7}$.

У процесі Парето-оптимізації отримано також багатовимірні діаграми обміну (БДО) показників якості. Для ілюстрації деякі БДО наведено на рис. 1. Кожна точка БДО визначає потенційно найкращі значення одного із показників, яких можна досягти за фіксованих, але довільних значень інших показників якості.

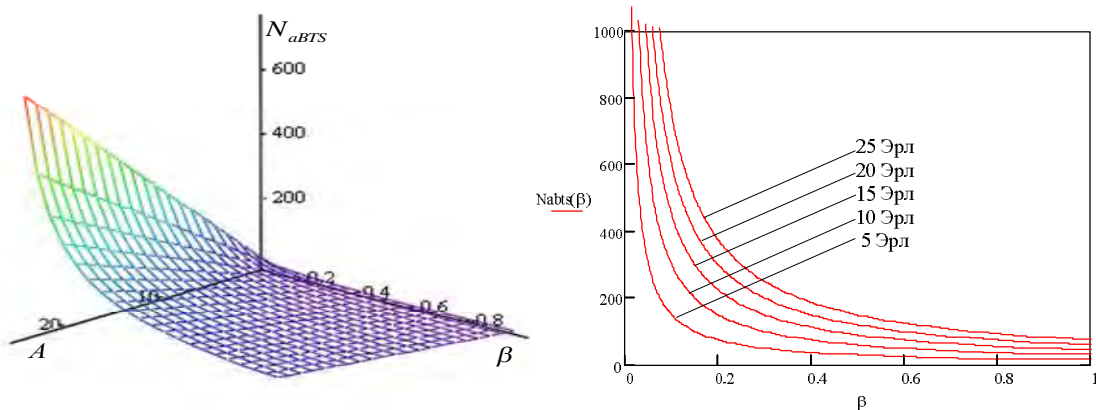


Рис. 1. Багатовимірні діаграми обміну показників якості СМЗ – кількості абонентів, що обслуговуються однією БС, навантаження і активності абонентів

Для вибору оптимальних проектних варіантів на основі методології багатокритеріальної оптимізації розроблено програму МСО (Multi Criterial Optimization). Програма розв'язує такі задачі:

- формування множини допустимих проектних варіантів;
- вибір і задання значень показників якості для проектних варіантів;
- вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів;
- звуження підмножини Парето до єдиного проектного варіанту з використанням методу на основі лексикографічного підходу та методу на основі теорії корисності.

Програму МСО реалізовано мовою Java. Інтерфейс програми показано на рис. 2.

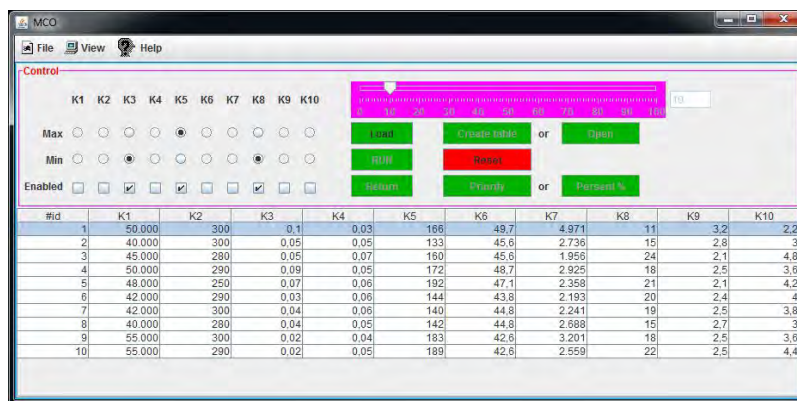


Рис. 2. Інтерфейс програми МСО для багатокритеріального вибору проектних варіантів

2. Вибір оптимальних проектних варіантів мережі передавання даних з урахуванням сукупності показників якості

Було розглянуто особливості застосування методології багатокритеріальної оптимізації при виборі оптимального проектного варіанта мережі передавання даних із пакетною комутацією при врахуванні сукупності показників якості [3]. Задано показники якості, які визначаються часом доставки та імовірністю втрати пакетів у межах дейтаграмного передавання повідомлень. Очевидно, що ці показники якості зв'язані між собою і є антагоністичними, тобто при поліпшенні значення одного з показників інший показник якості погіршується. Така задача проектування мережі передавання даних актуальна для практичних застосувань, що критичні до вчасної доставки повідомлень, зокрема, у системах передавання відео- й мовних повідомлень, системах банківських терміналів, системах сигналізації, системах усунення несправностей у мережах зв'язку.

Побудовано математичну модель повнзв'язної топології мережі передавання даних. До структури математичної моделі мережі введено імітатори джерел повідомлень, процедури пакування повідомлень у пакети та передавання їх каналами зв'язку, процедури маршрутизації й обслуговування у вузлах комутації, імітатори помилок у каналах зв'язку. Моделювали джерела

повідомлень за пуассонівським законом розподілу й різними інтенсивностями потоку заявок. Моделювали також різні затримки під час передавання пакетів, зв'язаних з кінцевою швидкістю поширення сигналів у каналах зв'язку, фіксованою пропускною здатністю каналів, а також часом перебування пакетів у черзі на передавання каналами зв'язку. Реалізовано різні варіанти роботи мережі, які відрізнялися дисциплінами обслуговування пакетів даних у чергах, способами маршрутизації під час передавання пакетів і розміром вікна транспортного з'єднання.

У розглянутій задачі задано тридцять шість варіантів роботи мережі. У результаті імітаційного моделювання для кожного варіанта мережі знайдено оцінки таких показників якості: середнього часу доставки пакетів $k_1 = \bar{T}$ і середньої ймовірності втрати повідомлення $k_2 = \bar{P}$. При цьому отримано допустиму множину варіантів роботи мережі, що були представлені у критеріальному просторі оцінок показників якості, нормованих до максимальних значень (рис. 1). Тут виділено підмножину Парето-оптимальних варіантів мережі виключенням безумовно гірших варіантів за критерієм Парето. Цій підмножині відповідає ліва нижня границя множини припустимих варіантів мережі, що містить варіанти: 1, 10, 11, 13, 17, 20.

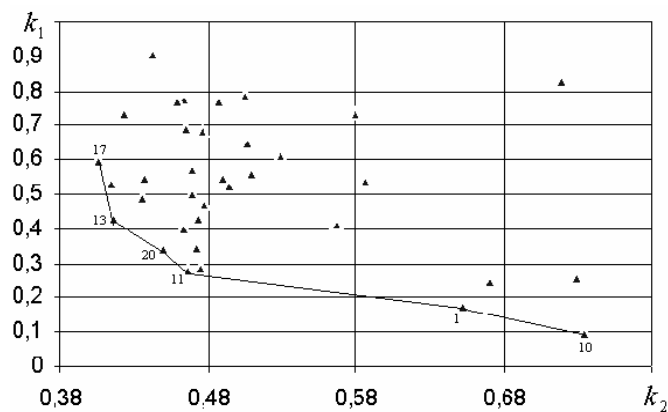


Рис. 3. Вибір Парето-оптимальних варіантів мережі передавання даних у критеріальному просторі

Серед Парето-оптимальних варіантів мережі обрано єдиний варіант із застосуванням УКП – за умови мінімуму скалярної функції цінності у вигляді результуючого показника якості $k_p = C_1 k_1 + C_2 k_2$. Для випадку $C_1 = 0,4$, $C_2 = 0,6$ обрано єдиний варіант роботи мережі 11, який характеризувався: дисципліною обслуговування потоку заявок – у випадковому порядку, способом маршрутизації – рівномірним відповідно до ваги, розміром “вікна” передавання, що дорівнює 8.

3. Оптимальна маршрутизація в мультисервісних мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості

Мультисервісна мережа зв'язку являє собою складну систему з множиною елементів для забезпечення високої якості обслуговування різних типів трафіка. При цьому актуальним завданням є оптимальна маршрутизація з урахуванням сукупності показників якості. Це визначає необхідність застосування методології багатокритеріальної оптимізації при плануванні маршрутизації в таких мережах зв'язку [3].

Завдання оптимальної маршрутизації з урахуванням сукупності показників якості представляється моделлю $\{X, F\} \rightarrow x^*$, де $X = \{x\}$ – множина припустимих варіантів маршрутизації; $F(\bullet)$ – цільова функція вибору; x^* – оптимальний розв'язок задачі маршрутизації. Багатокритеріальний підхід передбачає декомпозицію цільової функції $F(\bullet)$, тобто її еквівалентного представлення за допомогою сукупності окремих функцій вибору $F_v(x), v = 1, \dots, N$.

При цьому може бути сформульована така багатокритеріальна задача маршрутизації. Задано множину припустимих рішень (маршрутів) на кінечному графі мережі $G = (V, E)$, де V – множина вузлів, E – множина ліній зв'язку. Припустима множина маршрутів X – це ті рішення $x \in X$ у

вигляді підграфів $x = (V_x, E_x)$ для графу $G = (V, E)$, які задовольняють певні обмеження $V_x \in V, E_x \in E$. Припускають, що на множині X задано векторну цільову функцію $\bar{F}(x) = (F_1(x), \dots, F_V(x), \dots, F_m(x))$, складові якої визначають значення відповідних показників якості маршрутів k_v . Показники якості маршрутів, як правило, зв'язані між собою й антагоністичні. Потрібно знайти оптимальні за сукупність показників якості варіанти маршрутів. Вирішенням такого завдання є підмножина Парето-оптимальних варіантів маршрутизації, яким відповідає узгоджений оптимум окремих цільових функцій $F_1(x), \dots, F_V(x), \dots, F_m(x)$.

Кожний маршрут визначається відповідними комбінаціями ліній зв'язку $E_x \in E$ і характеризується сукупністю показників якості обслуговування $k_v, v = \overline{1, m}$ та відповідними їм окремими цільовими функціями $F_1(x), \dots, F_V(x), \dots, F_m(x)$.

Вибір оптимальних маршрутів з урахуванням сукупності показників якості передбачає виділення підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутизації. Варіант маршруту $x^* \in X$ є Парето-оптимальним, якщо не існує іншого маршруту $\tilde{x} \in X$, для якого виконуються нерівності $F_V(x^*) \leq F_V(\tilde{x}), v = 1, \dots, m$, причому, хоча б одним з них є строгим. При порівнянні маршрутів за цим безумовним векторним критерієм переваги з множини допустимих варіантів вилучають безумовно гірші варіанти маршрутів і залишають незрівнянні між собою Парето-оптимальні варіанти маршрутів.

Для знаходження Парето-оптимальних варіантів маршрутизації можна використати ваговий метод. Він зводиться до знаходження екстремальних значень скалярної цільової функції маршрутів при різних припустимих комбінаціях значень коефіцієнтів $\lambda_i (\lambda_i > 0, \sum_{i=1}^V \lambda_i = 1)$

$$\text{var}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_V) \left(F_P(x) = \sum_{v=1}^m \lambda_v F_V(x) \right). \quad (11)$$

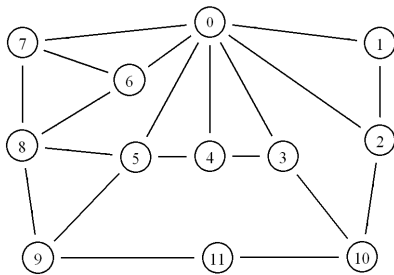


Рис. 4. Структура досліджуваної мережі зв'язку

Розглянуто деякі практичні особливості розв'язання багатокритеріальної задачі маршрутизації на прикладі фрагмента мережі зв'язку (рис. 4).

Інформація передається з вузла 0 в усі інші вузли. Введено наступні показники якості ліній зв'язку: k_1 – час затримки пакетів; k_2 – рівень втрат пакетів; k_3 – вартість використання лінії зв'язку. Значення нормованих до максимальних значень показників якості ліній зв'язку наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Нормовані значення показників якості ліній зв'язку

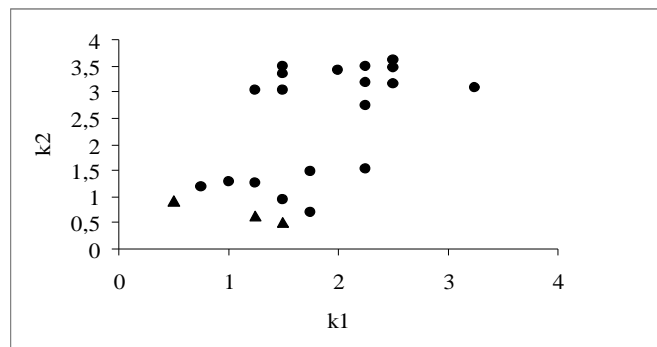
Лінії зв'язку	k_1	k_2	k_3
1	2	3	4
0-1	0,676	1	0,333
0-2	1	0,25	1
0-3	0,362	1	0,333
0-4	0,381	0,25	1
0-5	0,2	1	0,333
0-6	0,19	1	0,333
0-7	0,571	0,25	1
7-6	0,4	0,25	0,333
7-8	0,362	0,25	0,667

1	2	3	4
8-6	0,314	0,5	0,5
8-5	0,438	0,25	0,333
8-9	0,248	0,5	0,333
9-5	0,257	0,25	1
9-11	0,571	0,25	0,667
11-10	0,762	0,25	0,333
5-4	0,381	0,25	0,667
2-10	0,457	0,25	0,333
3-10	0,79	0,25	0,333
4-3	0,286	0,25	0,333
1-2	0,448	0,25	0,333

Під час аналізу мережі видно, що для кожного вузла призначення існує значна кількість варіантів маршрутів. Наприклад, під час передавання з вузла 0 до вузла 8 кількість маршрутів становить 22.

Для ілюстрації на рис. 5 зображено деяку множину варіантів маршрутів між вузлами 0 і 8 у просторі оцінок показників якості k_1 й k_2 . Підмножині Парето-оптимальних варіантів маршрутів, знайдених описаним ваговим методом, відповідає ліва нижня границя, що містить три варіанти, позначені знаком \blacktriangle . Цій підмножині відповідає узгоджений за Парето-оптимум показників якості, тобто мінімально можливе значення одного з показників якості при зміні значень іншого показника якості.

Рис. 5. Вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутів у просторі оцінок показників k_1 й k_2



Знайдені Парето-оптимальні варіанти маршрутів незрівнянні з погляду БКП – критерію Парето. Отриману підмножину Парето-оптимальних варіантів маршрутів можна використати для організації багатопляхової маршрутизації, зокрема, у технології MPLS. За таким підходом можна вирівнювати навантаження й керувати трафіком, забезпечуючи задану якість обслуговування за сукупністю показників якості.

4. Вибір переважного варіанта протоколу маршрутизації в ad-hoc мережах за методом аналізу ієрархій

Метод аналізу ієрархій (МАІ) базується на отриманні і формалізованій обробці інформації від експертів у вигляді матриць парних порівнянь важливості показників якості, а також проектних варіантів відносно кожного показника якості [4]

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

де a_{ij} – оцінки парних порівнянь відповідних елементів.

З математичного погляду обробка матриць парних порівнянь зводиться до обчислення головного власного вектора матриці, який після певного нормування стає вектором пріоритетів елементів порівнянь на певному рівні ієрархії. Обчислені оцінки компонент головного власного вектора визначаються співвідношенням

$$V_i = n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

а оцінки компонент вектора пріоритетів показників – співвідношенням

$$P_j = \frac{V_n}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Аналогічно обчислюються вектори пріоритетів проектних варіантів відносно кожного показника якості Q_{1j} .

Отримані компоненти векторів пріоритетів використовуються для обчислення компонент вектора глобальних пріоритетів за співвідношенням

$$C_j = \sum_{i=1}^N P_i P_{ij}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (15)$$

Переважає проекту варіанту відповідає номер максимальної компоненти вектора глобальних пріоритетів (15).

Розглянуто особливості застосування методу аналізу ієрархій для вибору єдиного переважного варіанта протоколу маршрутизації в ad-hoc мережах з урахуванням сукупності показників якості [4]. Як показники якості протоколів обрано основні характеристики протоколів, зокрема, k_1 – час конвергенції; k_2 – пам'ять; k_3 – управління.

Таблиця 2

Вихідні дані для показників якості протоколів маршрутизації

Тип протоколу маршрутизації	Показники якості протоколів		
	k_1	k_2	k_3
DSDV	O(D·I)	O(N)	O(N)
OLSR	O(D·I)	O(N ²)	O(N ²)
WRP	O(h)	O(N ²)	O(N)
AODV	O(2·D)	O(2·N)	O(2·N)
DSR	O(2·D)	O(2·N)	O(2·N)

Тут наведено співвідношення, які визначають залежність показників якості протоколів маршрутизації від основних характеристик мережі, зокрема, O(.) – означає порядок складності мережі; D – діаметр мережі; I – середній час відновлення; N – кількість вузлів у мережі; h – висота дерева маршрутизації. Неважко бачити, що ці показники якості зв'язані між собою і мають конкуруючий характер.

Згідно з методом аналізу ієрархій побудовано матрицю парних порівнянь важливості показників якості протоколів маршрутизації (табл. 3).

Таблиця 3

Матриця парних порівнянь важливості показників якості протоколів маршрутизації і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	k_1	k_2	k_3	V_j	P_j
k_1	1	1/3	1/5	0,405	0,1006
k_2	3	1	1/4	0,909	0,226
k_3	5	4	1	2,71	0,673

Потім виконано парні порівняння альтернативних варіантів протоколів маршрутизації по відношенню до обраних показників якості та отримані відповідні матриці парних порівнянь. В результаті обробки отриманих матриць обчислені власні вектори і вектори пріоритетів, що наведені в табл. 4–6.

Таблиця 4

Матриця парних порівнянь протоколів маршрутизації відносно часу конвергенції і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	V_{1j}	P_{1j}
DSDV	1	1/2	4	5	5	2,186	0,323
OLSR	2	1	4	5	5	2,885	0,427
WRP	2	1/2	1	1/3	1/3	0,368	0,054
AODV	1/5	1/5	3	1	2	0,752	0,111
DSR	1/5	1/5	3	1/2	1	0,569	0,084

Таблиця 5

Матриця парних порівнянь протоколів маршрутизації відносно пам'яті і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	V_{2j}	P_{2j}
DSDV	1	1/4	1/4	1/3	1/3	0,368	0,06
OLSR	4	1	2	3	3	2,352	0,384
WRP	4	1/4	1	3	3	1,782	0,291
AODV	3	1/3	1/3	1	2	0,918	0,15
DSR	3	1/3	1/3	1/2	1	0,698	0,114

Таблиця 6

Матриця парних порівнянь протоколів маршрутизації відносно управління і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	V_{3j}	P_{3j}
DSDV	1	1/5	1/2	1/3	1/3	0,026	0,004
OLSR	5	1	5	3	3	2,954	0,459
WRP	2	1/5	1	1/3	1/3	0,534	0,083
AODV	3	1/3	3	1	2	1,428	0,222
DSR	3	1/3	3	1/2	1	1,485	0,231

З використанням цих даних обчислено значення компонент глобального вектора пріоритетів згідно з (15), які наведено в останньому стовпчику табл. 7.

Таблиця 7

Результати обчислення значень компонент глобального вектора пріоритетів

№	Типи протоколів	P_{ij}			C_i
		k_1	k_2	k_3	
1	DSDV	0,323	0,06	0,004	0,048
2	OLSR	0,427	0,384	0,459	0,438
3	WRP	0,054	0,291	0,083	0,127
4	AODV	0,111	0,15	0,222	0,194
5	DSR	0,084	0,114	0,231	0,189
P_j		0,1006	0,226	0,673	

Максимальному значенню компонент вектора глобальних пріоритетів \vec{C} відповідає переважний варіант протоколу маршрутизації в ad-hoc мережах з урахуванням введених показників якості. Таким є протокол маршрутизації OLSR, який базується на алгоритмі Дейкстри.

5. Вибір переважного протоколу маршрутизації бездротової сенсорно-актуаторної мережі

Сьогодні активно розвиваються бездротові сенсорно-актуаторні мережі (БСАМ), які ефективно використовуються для вирішення прикладних завдань розподіленого збирання інформації про контрольовані параметри у мережах моніторингу [5]. Такі мережі є гомогенними, самоорганізуючими, одноранговими, з комірчастою топологією, вузли яких здатні до ретрансляції інформації. Автономні джерела споживання у вигляді батарей у цих мережах накладають жорсткі обмеження щодо енергоефективності на всі протоколи маршрутизації, застосовувані в сенсорних мережах. Тому для БСАМ важливими є завдання маршрутизації, зокрема пошуку оптимальних щодо енергоефективності маршрутів і пошуку маршрутів, що забезпечують максимальний час життя мережі. Розвиток БСАМ призвів до появи великої кількості протоколів маршрутизації. Це визначає актуальність вибору переважного протоколу маршрутизації для конкретної реалізації. Значним попитом для бездротових сенсорно-актуаторних мереж користуються такі алгоритми маршрутизації:

1. Централізовані алгоритми ґрунтуються на тому, що один вузол володіє знаннями про всю мережу. Ці алгоритми використовуються вкрай рідко через значні енерговитрати на передавання “головному вузлу” інформації про стан всієї мережі.

2. Розподілені алгоритми. На відміну від попередніх алгоритмів, зв’язок підтримується за рахунок обміну інформацією між вузлами.

3. Алгоритми, основані на місцезнаходженні. Вузли використовують інформацію про обмежену область навколо них і використовують цю інформацію для локальної маршрутизації.

Парадигма алгоритму маршрутизації є важливим фактором вибору протоколу маршрутизації для використання в конкретній мережі. Якщо використовувати алгоритми, призначені для роботи з обмеженою областю, то необхідно оптимізувати зв’язок між сусідніми вузлами. З іншого боку, для централізованих алгоритмів множина повідомлень, переданих тільки на центральний вузол, є перевагою. Використання розподілених алгоритмів потребує надійного і ефективного зв’язку між будь-якими парами вузлів. Своєю чергою, алгоритми на основі розташування, ефективність яких забезпечується знанням географічних координат, наприклад, за допомогою GPS, роблять рішення дорожчим.

Проведено порівняльний аналіз і багатокритеріальний вибір переважного варіанта маршрутизації методом аналізу ієрархій для деякої множини протоколів маршрутизації в БСАМ [5]. Коротко розглянемо основні характеристики цих протоколів маршрутизації.

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) є адаптивним протоколом маршрутизації, який дає змогу вибирати маршрути передавання інформації з високою енергетичною ефективністю.

Directed Diffusion – протокол маршрутизації, орієнтований на дані (data-centric). У мережах, що використовують цей протокол для маршрутизації, сенсорні вузли використовують зв’язку “атрибут–значення”.

Rumor Routing. Цей протокол маршрутизації має використовувати запити від БС, що поширюються по всій мережі вузлів, які спостерігали події, відображені в запиті.

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). Ці протоколи маршрутизації роль глави кластера періодично виконують різні вузли мережі для рівномірного використання енергії.

Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN). У цьому протоколі маршрутизації на відміну від ієрархічних протоколів використовують для реактивних мереж, які негайно реагують на зміну різних параметрів.

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS). Цей протокол маршрутизації вважають поліпшенням протоколу LEACH. Замість розподілу вузлів у кластери він передбачає формування мережі сенсорних вузлів. На основі цієї структури кожен вузол передає і приймає інформацію тільки від одного найближчого сусіднього вузла.

Self-Organizing Protocol (SOP). Цей протокол маршрутизації і самоорганізації використовують у гетерогенних сенсорних мережах із підтримкою як стаціонарних, так і мобільних вузлів. Прикінцеві датчики, які збирають інформацію про атрибути навколишнього середовища, передають дані певному числу вузлів, які виконують роль маршрутизаторів.

Geographic Adaptive Fidelity (GAF). Протокол маршрутизації спрямований на оптимізацію продуктивності БСАМ завдяки пошуку еквівалентних вузлів з погляду передавання інформації.

Еквівалентними вважаються такі вузли, які можуть підтримувати зв'язок одним і тим самим способом і множиною сусідніх вузлів.

Geographic and Energy and Aware Routing (GEAR). Протокол маршрутизації, який заснований на знанні розташування вузлів. Локалізація відбувається за допомогою глобального позиціонування інших систем.

Sequential Assignment Routing (SAR). Це один із перших протоколів маршрутизації в БСМ, який забезпечує Quality Of Service (QoS – якість послуг) критеріїв маршрутизації. Він базується на виставленні атрибутів рівня пріоритету кожного пакета.

A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks (SPEED). Цей протокол маршрутизації також забезпечує QoS. Для його роботи потрібно, щоб кожен вузол зберігав інформацію про своїх сусідів і використовував дані про їх географічне положення для пошуку шляхів.

Розглянуто особливості застосування МАІ для вибору переважного протоколу маршрутизації в БСМ з урахуванням сукупності показників якості. Було отримано від експертів дані про парні порівняння важливості показників якості та протоколів маршрутизації в БСМ відносно до кожного показника якості. Ці дані опрацьовано згідно з (13)–(15) і отримано значення компонент вектора глобальних пріоритетів, що наведені у табл. 8.

Із табл. 8 видно, що згідно з методом аналізу ієрархій переважним варіантом маршрутизації в БСМ є протокол маршрутизації N9 – GEAR, що відповідає максимальній компоненті вектора глобальних пріоритетів C_i . Це протокол маршрутизації, який оснований на знанні розташування інших вузлів.

Таблиця 8

Вибір переважного протоколу маршрутизації БСМ

Номер протоколу маршрутизації	Компоненти вектора глобальних пріоритетів C_i
N1	0,0442
N2	0,077
N3	0,0589
N4	0,1103
N5	0,1426
N6	0,0237
N7	0,0299
N8	0,2076
N9	0,2721
N10	0,023
N11	0,0145

6. Вибір переважної технології мережі мобільного зв'язку

Для порівняльного аналізу вибрано такі технології, що використовуються в СМ3: HSPA (реліз 7 і окремі поправки до релізу 8), WiMAX (реліз 1.5) і LTE [6]. У табл. 9 наведено значення показників якості для вказаних технологій: k_1 – спектральна ефективність; k_2 – радіус дії; k_3 – швидкість передавання даних.

Таблиця 9

Вихідні дані для порівняльного аналізу технологій мобільного зв'язку

Показники якості	HSPA		WiMAX	LTE
	Реліз 7	Реліз 8	Реліз 1.5	
k_1 , бит/Гц/с	0,87	1,75	1,59	1,57
k_2 , км	30	40	50	5
k_3 , Мбіт/с	21	35	48	75

Таблиця 10

Результати обчислень компонент глобального вектора пріоритетів технологій СМС 4-го покоління

	P_{1j}	P_{2j}	P_{3j}	C_i
N_1	0,057	0,13	0,043	0,0553
N_2	0,494	0,279	0,093	0,2158
N_3	0,285	0,548	0,359	0,3586
N_4	0,165	0,043	0,505	0,3704
P_j	0,26	0,1	0,64	

Показники якості вказаних технологій мають конкуруючий характер. Тому для вибору переважної технології необхідно застосувати методи багатокритеріальної оптимізації. З цією метою використано метод аналізу ієрархій. Отримана матриця парних порівнянь показників якості, для якої обчислено згідно з (13), (14) компоненти головного власного вектора і вектора пріоритетів. Потім проведені парні порівняння технологій відносно вибраних показників якості. Після обробки відповідних матриць парних порівнянь отримані відповідні вектори пріоритетів. Отримані вектори пріоритетів наведено в табл. 10 і використано для обчислення вектора глобальних пріоритетів згідно зі співвідношенням (15). Компоненти цього вектора C_i наведено в останньому стовпці табл. 10.

Максимальному значенню компонент вектора глобальних пріоритетів відповідає переважний варіант технології з номером N_4 . Це технологія LTE зі швидкістю передавання даних – 75 Мбіт/с, спектральною ефективністю -1,57 біт/Гц/с і радіусом дії базових станцій – 5км.

Висновки

У цій роботі розглянуто практичні особливості застосування методології багатокритеріальної оптимізації під час розв'язання задач планування і проектування мереж зв'язку з урахуванням сукупності показників якості на прикладі багатокритеріального вибору оптимальних варіантів мереж зв'язку у задачах номінального планування стільникових мереж зв'язку, вибору оптимальних варіантів структури мережі передавання даних, вибору оптимальної маршрутизації у мультисервісній мережі зв'язку, вибору переважних варіантів протоколу маршрутизації в ad-hoc мережі та у бездротовій сенсорно-актуаторній мережі, вибору переважної телекомунікаційної технології у мережах мобільного зв'язку.

1. Безрук В. М., Чеботарьова Д. В., Скорик Ю. В. *Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций: монография*. Харьков: ФОП Коряк С.Ф., 2017. 268 с. 2. Bezruk Valeriy, Chebotarova Dariya. *Methods of multi-criteria optimization in planning networks of mobile communication // Information and Telecommunication Sciences*. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 2014. Volume 5, Number 2. P. 21–25. 3. Bezruk V. M., Bukhanko A. N., Chebotareva D. V., Varich V. V. *Multicriterion optimization in telecommunication networks planning, designing and controlling // Open access book "Telecommunications Networks. Current status and future trends". Chapter 11*. Rijeka: INTECH, 2012. P. 251–274. 4. Скорик Ю. В., Гальченко К. Р., Безрук В. М. *Многокритериальный выбор предпочтительного протокола маршрутизации в ad hoc сетях методом анализа иерархий // Проблемы телекоммуникаций*. Харьков, 2017. № 1 (20). С. 14–21. 5. Bezruk V., Zelenin A., Vlasova V., Skorik J. *Selection of preferred routing protocols of wireless sensor and actuator network nodes // Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Volume 1, Issue 9. P. 4–9. 6. Bezruk V. M., Skorik Yu. V. *Multicriterial choice of telecommunication means using hierarchical analysis method // Information and Telecommunication Sciences*. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 2015. Volume 6, Number 2. P. 18–24.