

**УДК 621.39**

# АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ



Л.О. ШЕБАНОВА

В.В. ТУРУПАЛОВ

Донецький національний  
технічний університет

Запропоновано методику оцінювання надійності транспортних телекомунікаційних мереж на базі векторного синтезу. Для розв'язання багатокритеріальної невизначеності використано методи, що застосовуються в умовах невизначеності або часткової невизначеності, а також нечітко-ймовірнісний підхід.

*In this article the reliability evaluation method based on vector synthesis for transport telecommunications networks is proposed. The methods with uncertainty or partial uncertainty conditions and fuzzy-possibilistic approach are used to resolve the uncertainties of multicriterion problem.*

Предложена методика оценивания надежности транспортных телекоммуникационных сетей на базе векторного синтеза. Для разрешения многокритериальной неопределенности использованы методы, применяемые в условиях неопределенности или частичной неопределенности, а также нечетко-вероятностный подход.

## Вступ

На етапі будівництва та експлуатації транспортної телекомунікаційної мережі (ТКМ) оператор зацікавлений у тому, щоб мережа відповідала необхідним критеріям надійності та якості послуг, що надаються. Задача вибору найкращого варіанту транспортної мережі на етапі проектування в умовах обмеженого фінансування є найбільш типовою.

На сьогоднішній день абсолютно недоцільним і практично неможливим є визначення тільки одного частинного критерію для транспортних ТКМ. Актуальним є питання забезпечення оптимальності мережі, що проектується, одночасно за декількома критеріями, причому ці критерії можуть мати на об'єкт різний вплив. Більшість відомих математичних методів оптимізації розроблені щодо скалярного синтезу за одним критерієм. Серед авторів, що досліджували проблему векторного синтезу, можна зазначити наступних: Безрук В. [1, 2, 3], Свід І. [1], Корсун І. [1], Рубалко Д. [2], Чеботарьова Д. [3], Lieska K., Laitinen E. [4], Jaffres-Runser K., Gorse J.-M., Ubeda S. [5], Collette Yann, Siarty Patrick [6] та ін. В публікації [1] проводиться оптимізація різноманітних мереж на різних етапах проектування з використанням методу звуження. На відміну від цього, в роботі [2, 3] представлені теоретичні та практичні особливості використання методів багатокритеріальної оптимізації для різних етапів планування мереж стільникового зв'язку. Парето-оптимальні проектні рішення знаходяться шляхом оптимізації зваженої суми частинних цільових функцій. Звуження підмножини Парето проводиться на основі побудови скалярної функції цінності. Публікація [4] присвячена знаходженню біноміальної об'єктивної функції, а оптимальне рішення знаходиться з використанням генетичних алгоритмів. В основу ро-

боти [5] покладено марківську модель. Алгоритм пошуку оптимального рішення зроблений на основі ймовірнісних характеристик об'єктів, а критеріями виступають характеристики QoS (Quality of Service), тобто розглядається взаємодія параметрів одного характеру впливу. Різноманітні методи оптимізації досліджуються в [6]. Крім цього представлені практичні приклади, переваги та недоліки методів, більшість яких оснований на введенні вагових коефіцієнтів.

На відміну від проаналізованих публікацій, в представленій статті проводиться вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації за обраними показниками функціональної надійності вузлів і каналів (за критерієм ймовірності відмов у мережі), пропускну здатності (перевантаження в мережі) і вартості мережі (за критерієм капітальних витрат), тобто здійснюється пошук оптимального для найбільш важливих та впливовіших показників транспортних ТКМ. Результатом оптимізації є формування оптимального вектора надійності роботи мережі як показника якості її функціонування та оптимальна структура мережі на базі кільцевих архітектур. Область Парето оптимальних рішень формується на основі декількох методів, які застосовуються в умовах невизначеності або часткової невизначеності, а для вибору єдиного рішення використовуються нечітка міра Сутено. Вирішення поставленої задачі дозволить автоматизувати та оптимізувати процес планування нових транспортних мереж, модернізації і реконфігурації існуючих. Крім цього, це дозволяє уникнути суб'єктивних рішень інженера планування, на підставі яких, на сьогоднішній день, відбувається оптимізація та планування транспортних ТКМ, і знизити ризик прийняття некоректного рішення. Запропонована методика дозволяє проводити оптимізацію мережі не тільки на етапі планування, але й на етапі експлуатації.

## 1. Визначення частинних критеріїв для оптимізації транспортної телекомунікаційної мережі

Задача багатокритеріальної оптимізації (векторного синтезу) представляє пошук найкращого значення для деякої множини характеристик об'єкта (транспортної ТКМ), тобто деякого компромісу (оптимального) між частинними критеріями, за якими потрібно оптимізувати рішення [8,9]. Наведемо обґрунтування частинних критеріїв.

1. Критерій функціональної надійності. Даний критерій характеризується ймовірністю працездатності мережі. На етапі планування транспортної ТКМ повна ймовірність працездатності мережі визначається за формулою:

$$P = P_{(0)} + \sum_{k=1}^K \Phi_{(k)} P_{(k)}, \quad (1)$$

де  $P_{(0)}$  – ймовірність працездатності всіх маршрутів мережі;  $\Phi_{(k)}$  – умовна ймовірність зв'язності мережі;  $P_{(k)}$  – ймовірність відмови  $k$  елементів, через відмову яких транспортна ТКМ ще залишається в стані працездатності.

Повна ймовірність відмови мережі в передачі трафіка визначається як:

$$Q = 1 - P. \quad (2)$$

2. Критерій вартості. На етапі планування транспортної ТКМ, а також на всіх наступних етапах, доцільним, з погляду ефективності використання витрат, є оцінювання коефіцієнта використання капітальних витрат:

$$K_{ВКВ} = \frac{C_{NETWORK}}{C_{MAX\_NETWORK}}, \quad (3)$$

де  $C_{NETWORK}$  – капітальні витрати на будівництво транспортної мережі;  $C_{MAX\_NETWORK}$  – максимальні інвестиційні вкладення на будівництво мережі.

3. Критерій пропускної здатності. Характеризується перевантаженням і недовикористанням каналів і вузлів мережі. Коефіцієнти завантаження каналів і вузлів дозволяють оцінити рівень навантаження й обчислюються за формулами:

$$\mu_{zy\_i} = \frac{Y_{node\_i}}{C_{node\_i}}, \quad (4)$$

$$\mu_{зк\_i} = \frac{Y_{link\_ij}}{C_{link\_ij}}, \quad (5)$$

де  $Y_{node\_i}$  – навантаження на  $i$ -й вузол;  $Y_{link\_ij}$  – навантаження на канал, що зв'язує  $i$ -й та  $j$ -й вузли ТКМ;  $C_{node\_i}$ ;  $C_{link\_ij}$  – пропускна здатність вузла та каналу відповідно.

Якщо навантаження розподілене нерівномірно, то канали будуть простоявати або відбуватися перевантаження, надійність мережі буде знижуватися і оператор буде зазнавати фінансових втрат.

## II. Методика багатокритеріальної оптимізації

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації дозволяє одержати оптимум функції надійності мережі як якості її функціонування. Отже, кожен варіант побудови транспортної ТКМ  $T_i$  характеризується вектором:

$$K_i = \text{opt} \text{in}(C_i, N_i, V_i), \quad (6)$$

де  $K_i$  – вектор оптимального рішення для транспортної телекомунікаційної мережі;  $C_i$  – частинний критерій вартості мережі;  $N_i$  – частинний критерій функціональної надійності мережі;  $V_i$  – частинний критерій, який характеризує пропускну здатність транспортної мережі.

Для знаходження оптимального значення за трьома вищеведеними показниками будемо використовувати векторний синтез. Задача векторного синтезу полягає в тому, щоб з множини припустимих точок обрати таку точку, яка має оптимальне значення результуючого вектора.

Обрані частинні критерії дозволяють описати параметри транспортних ТКМ для подальшої оптимізації. Розглянемо  $v_i$  варіантів рішень для транспортної ТКМ. Кожному з варіантів відповідають три ситуації  $S_1, S_2, S_3$ , у результаті яких частинні показники приймають значення  $N_i, C_i, V_i$ . Серед запропонованих варіантів рішень необхідно обрати оптимальний варіант  $v_i$ , керуючись значенням узагальненого по-

казника компромісного розв'язання задачі  $q(c)$ . Саме на підставі значення величини  $q(v_i)$  буде обрано компромісний варіант одночасно за трьома частинними критеріями – надійності, пропускної здатності та вартості.

Ситуації й відповідні їм значення показників представлені в матриці  $G$ :

$$G = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \\ v_1 & g_{11} = N_1, & g_{12} = V_1, & g_{13} = C_1, \\ v_2 & g_{21} = N_2, & g_{22} = V_2, & g_{23} = C_2, \\ v_3 & g_{31} = N_3, & g_{32} = V_3, & g_{33} = C_3, \\ v_4 & g_{41} = N_4, & g_{42} = V_4, & g_{43} = C_4, \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_l & g_{l1} = N_l, & g_{l2} = V_l, & g_{l3} = C_l, \end{pmatrix} \quad (7)$$

де  $S_1, S_2, S_3$  – ситуації, коли система приймає деякі значення для показників надійності, пропускної здатності й вартості відповідно;  $v_1, v_2, \dots, v_l$  – варіанти для пошуку оптимального розв'язання задачі.

Кожний з розглянутих частинних критеріїв має свою розмірність. Щоб застосувати метод оптимізації, необхідно спочатку виконати нормування частинних показників. Для зменшення міри невизначеності необхідно провести зменшення області рішень. Для цього будемо використовувати методи, які застосовуються в умовах невизначеності або часткової невизначеності. Варіанти рішень для транспортної ТКМ, які співпадають мінімум для трьох методів, сформулюють область Парето. До таких методів відносяться:

1. Метод рівних ймовірностей. Для даного методу оптимальним вважається варіант  $v_i$ , у якому узагальнений показник  $q_{ps}$  мінімальний:

$$v_{optim} = \arg \min_i \left\{ q_{ps}(v_i) = \bar{g}(v_i) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k g_{ij}, i = \overline{1, l} \right\}, \quad (8)$$

де  $k$  – кількість показників (у нашому випадку  $k=3$ ).

2. Метод Гурвіца. Оптимальним буде варіант  $v_i$ , для якого узагальнений показник  $q_{\Gamma}$  мінімальний:

$$v_{optim} = \arg \min_i \{ q_{\Gamma}(v_i) = c \cdot q_{i\_min} + (1-c) \cdot q_{i\_max}, i = \overline{1, l} \}, \quad (9)$$

де  $q_{i\_min} = \min_j \{ q_{ij}, j = \overline{1, k} \}$ ;  $q_{i\_max} = \max_j \{ q_{ij}, j = \overline{1, k} \}$ ;  $c$  – ваговий коефіцієнт;  $c \in (0, 1)$ .

3. Метод Шанявського. Метод використовує результати, одержані методом рівної ймовірності з деякою корекцією. Оптимальним буде вважатися варіант:

$$v_{optim} = \arg \min_i \{ q_{Ш}(v_i) = c \cdot q_{PB}(v_i) + (1-c) \cdot q_{i\_min}, i = \overline{1, l} \}. \quad (10)$$

4. Мінімаксний метод. У випадку застосування методу для кожного варіанту визначають максимальні значення серед показників. Надалі серед них визначається мінімальне значення узагальненого показника  $q_{\min \max}(v_i)$  і варіант  $v_i$  є оптимальним:

$$v_{optim} = \arg_{\min_i} \{q_{\min}^i(v_i)\}, \quad q_{\min}^i(v_i) = \max_j \{g_{ij}\}. \quad (11)$$

5. Метод Севіджа. Для кожної ситуації  $S_k$  знаходимо мінімальні значення:

$$g_{i1\_min}, g_{i2\_min}, \dots, g_{ik\_min}. \quad (12)$$

Отримані значення (12) віднімаємо від кожного значення, що знаходиться у відповідному стовпці матриці (7). У результаті одержуємо матрицю  $H$  (у нашому випадку матриця містить три стовпці):

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} = g_{11} - g_{i1\_min}, & h_{12} = g_{12} - g_{i2\_min}, & h_{13} = g_{13} - g_{i3\_min} \\ h_{21} = g_{21} - g_{i1\_min}, & h_{22} = g_{22} - g_{i2\_min}, & h_{23} = g_{23} - g_{i3\_min} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{l1} = g_{l1} - g_{i1\_min}, & h_{l2} = g_{l2} - g_{i2\_min}, & h_{l3} = g_{l3} - g_{i3\_min} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Оптимальним є варіант  $v_i$ , для якого показник  $q_{ces}$  відповідає умові:

$$v_{optim} = \arg_{\min_i} \{q_{ces}^i(v_i), i = \overline{1, l}\}, \quad q_{ces}^i(v_i) = \max_j \{h_{ij}, j = \overline{1, k}\}. \quad (14)$$

Варіанти, які обрані за методами, формують область Парето. Для оцінки образних компромісних варіантів і розв'язання багатокритеріальної невизначеності пропонується використовувати нечітко-ймовірнісний підхід. Нехай три показника приймають із множини  $S$  чіткі значення, тобто  $S_1, S_2, S_3 : V \rightarrow [0, \infty)$ , де  $V = \{v_i, i = \overline{1, l}\}$ . Облік впливу сукупності показників на оцінку варіантів з множини  $v$  пропонується здійснити шляхом побудови  $\lambda$ -нечіткої міри Сутено. Для цього здійснюється знаходження кореня з інтервалу  $(-1; \infty)$  наступного полінома  $(k-1)$ -го порядку:

$$\prod_{j=1}^k (1 + \lambda \cdot d_j) - 1 = \lambda, \quad (15)$$

де  $d_j$  – коефіцієнт важливості;  $k$  – кількість частинних показників ( $k=3$ ).

Далі обчислюється значення узагальненого показника на основі нечіткої згортки, що дозволяє враховувати нелінійний характер впливу частинних показників. Для цього використовуємо поняття нечіткого інтеграла за  $\lambda$ -нечіткою мірою Сутено:

$$q(v_i) = \int_{\alpha \in [0,1]} \min_{\alpha \in [0,1]} \{G_\lambda(S_\alpha(v_i), G_\lambda(S_\alpha(v_i)))\}, \quad (16)$$

$$S_\alpha(v_i) = S_j |_{h(S_j, v) \geq \alpha}, \quad G_\lambda(S_\alpha(v_i)) = \frac{\prod_{j \in S_\alpha(v_i)} (1 + \lambda \cdot d_j) - 1}{\lambda},$$

де  $S_\alpha(v_i) = S_j |_{h(S_j, v) \geq \alpha}$  – множина показників, ступінь впливу яких на оцінку варіанта  $v \in V$  перевищує поріг  $\alpha$ ;  $h : F \times V \rightarrow [0,1]$  – оцінна функція. За оцінку функцію  $h$  приймемо значення частинних показників, наведених до безрозмірного виду з носієм нечіткої множини  $S_j(v)$  в інтервалі  $[0,1]$ .



Визначений у результаті варіант, для якого узагальнений показник  $q(v_i)$  має максимальне значення та є оптимальним. Цей варіант буде кращою альтернативою в результаті розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації:

$$v_{optim} = \operatorname{argmax}_i \{q(v_i)\}. \quad (17)$$

### III. Реалізація запропонованої методики багатокритеріальної оптимізації

На підставі запропонованої методики було розроблено програмний продукт для розрахунків параметрів моделей. Розглянемо ситуацію для моделювання, коли кількість вузлів мережі дорівнює 100. Відповідна кількість отриманих рішень (ітерацій) склала 63.

На рис. 1 та 2 представлена множина точок, які є варіантами реалізації транспортної ТКМ із відповідними параметрами до моменту застосування запропонованої методики та після багатокритеріальної оптимізації. Для обох випадків представлені проекції точок на кожну з площин, а також їхнє зображення в тривимірному просторі з координатами  $C_i, N_i, V_i$ . Множина точок тривимірного простору поділена на дві групи: червоним зображені точки, які відповідають варіантам рішень, але не є оптимальними за Парето; зеленим – точки, які відібрані на основі методів (9)-(15) і співпадають мінімум для трьох методів та сформували область Парето. До етапу оптимізації точки мають значний розкид; після застосування методики оптимізації вони зосереджуються в області прийнятних для оператора рішень.

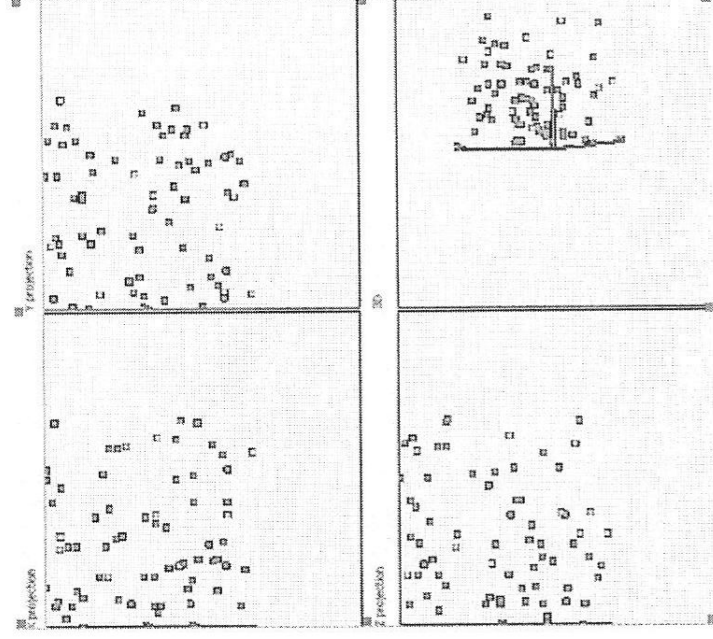


Рис. 1. Множина рішень до проведення процесу оптимізації

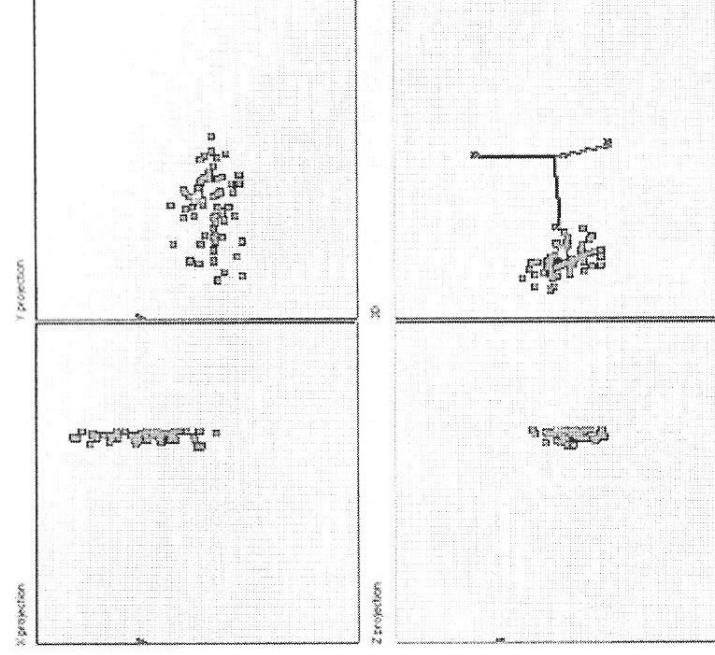


Рис. 2. Множина рішень після проведення оптимізації

Оптимальні варіанти рішень за Парето, що були отримані в результаті моделювання і представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Рішення для транспортної ТКМ, що формують область Парето

Надійність	Навантаження	Капітальні витрати	Реалізація
0,99999	0,58	0,77	9
0,99999	0,55	0,78	25
0,99999	0,55	0,79	37
0,99999	0,56	0,77	41
0,99999	0,55	0,78	47
0,99999	0,55	0,75	52
0,99999	0,57	0,75	57
0,99999	0,57	0,77	60
0,99999	0,58	0,75	62
0,99999	0,56	0,75	63

Розглянемо, наприклад, отримані дані моделювання за критерієм пропускну здатності – коефіцієнту навантаження мережі (рис. 3). До 45 ітерації включно модель перебуває у режимі самонавантаження, тому має значний розкид параметрів. Після 45 ітерації – область значень критерію зменшується та визначається оптимальне рішення. Слід зазначити, що до 10 ітерації алгоритм не знаходить точок, які вхо-

дять до області Парето, однак зі збільшенням числа реалізації кількість таких варіантів рішень зростає. Подібна тенденція характерна для всіх трьох частинних критеріїв, що досліджуються.

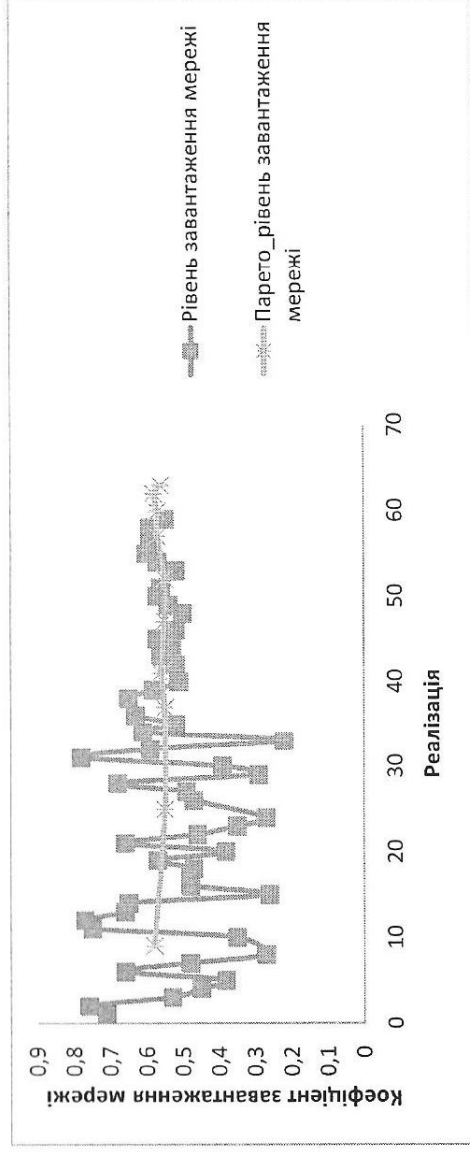


Рис. 3. Рівень завантаження транспортної ТКМ, визначення області Парето

Для множини точок, що є оптимальними за Парето, застосовується нечіткоюймовірнісний підхід. В результаті були знайдені координати такої точки (табл. 2), що має компромісне значення одночасно за трьома частинними критеріями.

Таблиця 2. Параметри оптимальної транспортної ТКМ

Надійність	Навантаження	Капітальні витрати	Реалізація
0,999999	0,56	0,75	63

Для оцінки ефективності запропонованої методики результати оптимізації транспортної ТКМ були порівняні з оцінками експертів. Експертами виступали інженери планування та розвитку первинної мережі спільникового оператора зв'язку. На рис. 4 та 5 представлені результати досліджень.

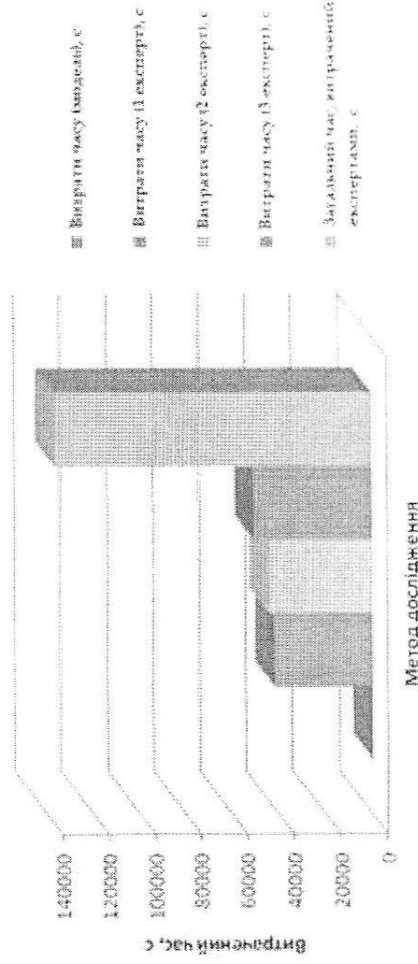


Рис. 4. Часові витрати на прийняття рішень



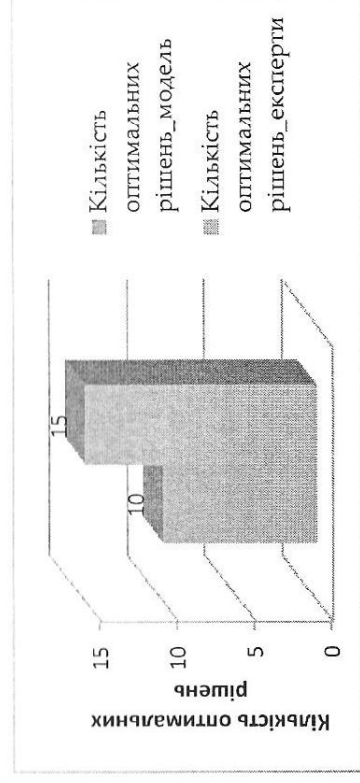


Рис. 5. Область невизначеності оптимальних рішень

Отже, програма визначає оптимальне рішення для транспортної ТКМ за 184 с, а експерти разом витратили на це приблизно 36 годин. Ще одна перевага програмного продукту полягає в наявності більш вузької області невизначеності оптимальних рішень.

## Висновки

З точки зору отриманих результатів запропонована методика багатокритеріальної оптимізації для транспортної ТКС та розроблений на її основі програмний продукт дозволяють спростити процес планування нових і модернізації існуючих транспортних ТКМ. Методика дозволяє уникнути суб'єктивних рішень інженера планування, на підставі яких, на сьогоднішній день, відбувається оптимізація та планування транспортних ТКМ. Новизна результатів полягає в отриманні оптимальних значень частинних критеріїв, якими характеризується транспортної ТКМ, враховуючи при цьому їх нелінійний характер впливу. Запропонована методика моделювання та оптимізації транспортних ТКМ, а також розроблений на базі методики програмний продукт можуть використовуватись на етапі, коли необхідно провести проектування нової транспортної мережі або оптимізувати існуючу інфраструктуру. Практичне використання методики корисне для підрозділів планування та розвитку транспортної мережі операторів телекомунікацій. Програмний продукт дозволяє скоротити час планування та модернізації мережі, а також зменшити витрати операторів на процес внесення змін або розгортання транспортних мереж. Оптимальні параметри дають можливість порівнювати реалізації побудови мережі з ефективними рішеннями та знаходити оптимальний шлях розвитку транспортної інфраструктури. Запропонована методика дозволяє проводити дослідження мереж різних топологій і технологій, використовуючи обґрунтовані критерії оптимізації.

## Список літератури:

1. Bezruk V., Svid I., Korsun I. Methods of Multicriteria Optimization in Telecommunication Networks Planning and Controlling // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science / Proceedings of conference International TCSET'2006, Lviv-Slavsko, 2006. – P. 381–383.

2. *Bezruk V., Rybalko D.* Multicriteria Optimization in Telecommunication Networks Planning // 17th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" / Proceedings of conference CriMiCo'2007, Sevastopol, 2007. – P. 338–340.
3. *Bezruk V., Chebotarova D.* Multicriteria optimization of projects solutions using performance characteristics method when planning mobile communication networks // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science / Proceedings of conference International TCSET'2008, Lviv-Slavyko, 2008. – P. 412–413.
4. *Lieska K., Laitinen E.* On multicriteria optimization of cellular networks // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications / 12th IEEE International Symposium on Publication. Vol. 1, 2007. – P. A-51–A-55.
5. *Jaffres-Rumser K., Gorce J.-M., Ubeda S.* Multiobjective QoS-Oriented Planning for Indoor Wireless LANs // IEEE 64th Vehicular Technology Conference, VTC-2006. – P. 1–5.
6. *Collette Y., Siarry P.* Multiobjective. Optimization. Principles and Case Studies. Series: Decision Engineering. – Berlin: Springer. Original french edition published by Groupe Eyrolles, 2007. – 293 p.
7. *Стеклов В.К. Беркман Л.Н., Кільчицький Є.В.* Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: підручник для вищ. навч. закладів. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.
8. *Беркман Л.Н. Кільчицький Є.В., Скобілова Н.М.* Математичні методи вирішення задач оптимізації проектування систем і мереж зв'язку: навчальний посібник. – К.: ДП УНДІЗ, 2002. – 92 с.