

**СУБАЧ ІГОР**

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0000-0002-9344-713X>e-mail: [subach1964@gmail.com](mailto:subach1964@gmail.com)**НЕКРУТЕНКО ВІКТОР**

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

<https://orcid.org/0009-0001-2843-7824>e-mail: [nvi200367@gmail.com](mailto:nvi200367@gmail.com)

## МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПРЯМКУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення ефективного функціонування електронних комунікаційних мереж зв'язку в умовах обмеженого фінансування, швидкого розвитку технологій зв'язку та підвищених вимог до якості й надійності електронного комунікаційного обладнання. Вирішення зазначеного завдання сприятиме підвищенню ефективності планування перспективних та модернізації існуючих електронних комунікаційних мереж зв'язку, забезпечуючи їхню готовність до виконання завдань у складних умовах експлуатації.

Запропоновано метод комплексного обґрунтування вимог до параметрів обладнання інформаційного напрямку електронних комунікаційних мереж зв'язку. Визначено, що задача комплексного обґрунтування вимог до параметрів обладнання інформаційних напрямків електронних комунікаційних мереж зв'язку зводиться до задачі оптимального розподілу виділеного ресурсу між параметрами оптимізації, кожний з яких вносить свій певний внесок у підвищення якості функціонування мережі та вимагає для цього різних витрат коштів для забезпечення заданого значення обраного показника якості. Показано, що комплексне обґрунтування вимог до параметрів обладнання електронних комунікаційних мереж зв'язку відноситься до задачі математичного програмування, у якій деякі змінні є безперервними, а інші можуть приймати дискретні значення. Аналіз цільових функцій дозволив виділити в якості змінних сукупність функціональних та експлуатаційно-технічних параметрів обладнання електронних комунікаційних мереж зв'язку. Для розв'язання сформульованої задачі доцільно використовувати процедуру, що заснована на ідеї прямого пошуку – процедура послідовної оптимізації з вибором певного кроку у множині значень вартісних параметрів.

Розроблений метод дозволяє науково обґрунтовувати кількісні вимоги до функціональних і експлуатаційно-технічних параметрів обладнання інформаційного напрямку електронних комунікаційних мереж зв'язку.

Ключові слова: параметри обладнання, мережі зв'язку, функціональні параметри, експлуатаційні параметри.

**SUBACH IHOR, NEKRUTENKO VIKTOR**

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## METHOD OF COMPLEX SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO THE PARAMETERS OF INFORMATION EQUIPMENT ELECTRONIC COMMUNICATION NETWORKS

The relevance of the study is due to the need to ensure the effective functioning of electronic communication networks in the context of limited funding, rapid development of communication technologies and increased requirements for the quality and reliability of electronic communication equipment. The solution to this problem will help to increase the efficiency of planning prospective and modernization of existing electronic communication networks, ensuring their readiness to perform tasks in difficult operating conditions.

A method of comprehensive substantiation of requirements for the parameters of equipment of the information direction of electronic communication networks is proposed. It is determined that the problem of complex substantiation of requirements for the parameters of equipment of information directions of electronic communication networks is reduced to the problem of optimal distribution of the allocated resource between the optimization parameters, each of which makes a certain contribution to improving the quality of the network functioning and requires different costs to ensure a given value of the selected quality indicator. It is shown that a comprehensive substantiation of the requirements for the parameters of equipment of electronic communication networks relates to the problem of mathematical programming, in which some variables are continuous, while others can take discrete values. The analysis of the objective functions made it possible to distinguish a set of functional and operational and technical parameters of the equipment of electronic communication networks as variables. To solve the formulated problem, it is advisable to use a procedure based on the idea of direct search – a sequential optimization procedure with the choice of a certain step in the set of values of cost parameters.

The developed method makes it possible to scientifically substantiate the quantitative requirements for the functional and operational and technical parameters of the equipment of the information direction of electronic communication networks.

Keywords: equipment parameters, communication networks, functional parameters, operational parameters.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із ключових завдань розвитку електронних комунікаційних мереж зв'язку (ЕКМЗ) є забезпечення високих показників якості та надійності їх функціонування. Для досягнення цієї мети необхідно комплексно обґрунтовувати вимоги до функціональних і експлуатаційно-технічних параметрів обладнання ЕКМЗ.

Комплексне обґрунтування вимог до параметрів обладнання ЕКМЗ є багатокрітеріальною

задачею, яка пов'язана з оптимальним розподілом обмежених ресурсів (фінансових, технічних чи часових) на модернізацію мережі зв'язку. Кожен із керованих параметрів (змінних) вносить свій певний внесок у підвищення показників якості функціонування мережі, проте потребує різних обсягів ресурсів для досягнення необхідних результатів.

Особливістю цієї задачі є те, що параметри оптимізації можуть мати різну природу: частина з них приймає безперервні значення (наприклад, пропускна здатність), інша – дискретні (рівень резервування).

У загальному випадку задача формалізується як задача частково дискретного нелінійного програмування, для якої наразі не існує універсальних точних аналітичних методів розв'язання.

Таким чином, виникає потреба в удосконаленні науково-методичного апарату, що включає методи, алгоритми й методики для вирішення задачі комплексного обґрунтування вимог до параметрів обладнання ЕКМЗ. Цей апарат повинен враховувати специфіку функціонування обладнання та обмеження ресурсів.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз публікацій [1 – 7] в даній предметній області показав, що їхня переважна більшість не враховує специфіку функціонування обладнання та реальні умови його експлуатації, що значно знижує практичну цінність отриманих результатів. У зв'язку з цим виникає потреба в удосконаленні науково-методичного апарату на основі якого можна науково обґрунтувати кількісні вимоги до параметрів обладнання (функціональних і експлуатаційно-технічних) досліджуваної ЕКМЗ.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** удосконалення науково-методичного апарату обґрунтування вимог до параметрів обладнання ЕКМЗ, який дозволить забезпечити оптимальне співвідношення між функціональними можливостями, експлуатаційними характеристиками та показниками якості і надійності функціонування обладнання в цілому.

#### Виклад основного матеріалу

Сутність методу полягає у виборі значень параметрів оптимізації (керованих факторів), що впливають на якість функціонування інформаційного напрямку ЕКМЗ, оптимальних за критерієм максимуму обраного показника – ймовірності своєчасної доставки повідомлення  $P_{cb}(t_d)$  [8].

Метод комплексного обґрунтування вимог до параметрів обладнання інформаційного напрямку мереж зв'язку спеціального призначення містить у собі наступні етапи:

1. Постановка задачі, обмеження та допущення.

Дано: структура мережі зв'язку спеціального призначення у виді мереж рівнів  $\eta$  кожна у вигляді графа  $G^\eta = (\theta^\eta, E^\eta)$  із множиною вершин  $\theta^\eta = \{\theta_z\}$ , де  $\theta_z$  – типи комутаційних центрів (КЦ) (маршрутизаторів); і ребер  $E^\eta = \{e_{ij}\}$ , де  $i, j = \overline{1, N}$ ,  $L = \|l_{ij}\|$  – матриця зв'язності,  $V = \|v_{ij}\|$  – матриця пропускних спроможностей ребер (ліній),  $L^r = \|\lambda_i^r\|$  де  $\lambda_i^r$  – інтенсивність надходження потоку пакетів на  $i$ -й КЦ;  $r = \overline{1, J}$  тип трафіку реального часу, критичний до затримок в мережі (телефонія, відео конференція),  $r = \overline{J+1, R}$  тип даних, критичний до втрат і не критичний до затримок в мережі (аудіо-, відео- на вимогу, електронна пошта, web-додатки).

На якість інформаційного обміну впливають наступні параметри:

функціональні:  $V$  – кількість обслуговуючих приладів (ОП),  $1 \leq V \leq V_{max}$ ;  $K$  – ємність накопичувачів (буферів),  $1 \leq K \leq K_{max}$  – ємність буферу;  $\sigma$  – довжина вхідних пакетів;  $k$  – кількість ланок (фаз) у маршруті;  $M_r = \{\mu_{\theta m}\}$ , де  $\mu_{\theta m}$  – маршрут;  $D_r$  – необхідна швидкість трафіку  $r$ -го типу;  $t_d$  – допустимий час доставки пакетів;  $u_1, u_2$  – середнє значення та дисперсія часу обслуговування пакетів;  $\omega$  – кількість груп каналів в  $i$ -му шляху;  $v$  – швидкість каналу;  $m$  – кількість резервних елементів (каналів);  $n$  – кількість основних (робочих) елементів (каналів);  $\gamma_1, \gamma_2$  – середнє значення та дисперсія часу надходження пакетів;

експлуатаційно-технічні:  $\bar{t}_b$  – середній час відновлення,  $\bar{t}_0$  – середній час напрацювання до відмови елемента (каналу);  $s_1, s_2$  – середнє значення та дисперсія часу відновлення;  $l$  – число ремонтних бригад;  $\lambda_c$  – інтенсивність збоїв обладнання основного (робочого) комплексу;  $\beta_1, \beta_2$  – середнє значення та дисперсія часу підключення резервного комплексу із ненавантаженого стану;  $n_1, n_2$  – середнє значення та дисперсія напрацювання до відмови;  $T_{to}^*$  – періодичність ТО;  $c_b, c_{to}$  – питомі витрат на відновлення та проведення ТО. Обмежений ресурс  $C_0$ , виділений на підвищення показника якості  $F(X)$  інформаційного обміну,  $X = (x_{ij})$  – вектор параметрів оптимізації;  $x_{ij} = \Psi(C)$  – залежність значень  $j$ -го параметра від вартості,  $j = \overline{1, k_i}$  в  $i$ -ой фазі обслуговування,  $i = \overline{1, n}$ .

Необхідно: визначити оптимальні (раціональні) значення параметрів, що забезпечують максимальнє значення показника якості функціонування інформаційних напрямків мережі зв'язку – ймовірності своєчасної доставки повідомлення  $P_{cb}(t_d)$ .

Приймемо наступні обмеження та допущення:

показники завадостійкості, живучості, достовірності і безпеки – фіксовані; система управління мережею зв'язку, її характеристики задані і не досліджуються; в мережі зв'язку передбачена фіксована (статична) маршрутизація; не враховуються функціональні можливості елементів мережі і системи управління на вибір шляхів встановлення з'єднань; вплив агресивних факторів на кожний окремо взятий елемент мережі є незалежними подіями; функції розподілу вихідних випадкових величин невідомі

(відомі тільки два їх початкові моменти); мережа миттєво та повністю спостерігається; після закінчення будь-яких відновлювальних робіт об'єкти мережі зв'язку повністю відновлюються; дисципліна обслуговування пакетів прийнята з відносним пріоритетом; відсутні повторні виклики; процеси надходження заявок та їх обслуговування незалежні.

Задача комплексного обґрунтування вимог до параметрів обладнання інформаційних напрямків мереж зв'язку спеціального призначенням зводиться до задачі оптимального розподілу виділеного ресурсу між параметрами оптимізації (керованими факторами), кожний з яких вносить свій певний внесок у підвищення якості функціонування мережі та вимагає для цього різних витрат коштів для забезпечення заданого значення обраного показника якості. Отже, необхідно знайти оптимальні (раціональні) значення параметрів  $x_{ij}^*$  ( $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, k_i}$ ;  $n$  – число фаз;  $k_i$  – число параметрів оптимізації в  $i$ -ої фазі), які забезпечують екстремум цільової функції  $F(X) = F(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik_i})$ ,  $i = \overline{1, n}$ , тобто  $\text{ext}F(X)$ ,  $X \in R$ , де  $R$  – допустима область рішень, яка визначається системою обмежень виду:  $f_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik_i}) \leq C_i, i = \overline{1, n}$ ;  $a_i \leq x_{ij} \leq b_i$  в якості цільової функції використовується

$$F(X) = F(x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijk}) = \Phi(X_1^{(\Phi)}, X_2^{(e)}),$$

де  $X_1^{(\Phi)} = \{x_{ij}^{(\Phi)}\}$  – множина функціональних параметрів;

$X_2^{(e)} = \{x_{ij}^{(e)}\}$  – множина експлуатаційно-технічних параметрів.

## 2. Розподіл виділених на модернізацію ЕКМЗ граничних ресурсів.

Будемо вважати, що показник якості функціонування  $P_{\text{св}}(t_d)$  не задовольняє заданим вимогам, тобто  $P_{\text{св}}(t_d) < P_{\text{св}}^{\text{тп}}(t_d)$ . Для поліпшення цього показника виділено певний (граничний) ресурс (кошти)  $C$ , який розподіляється між окремими інформаційними напрямками зв'язку по критерію їх важливості, а всередині кожного напрямку – між окремими маршрутами. В основі методики лежить відомий підхід, заснований на використанні експертного оцінювання [9].

3. Вибір цільової функції [10] для оцінки якості функціонування маршруту зв'язку та виділення параметрів оптимізації, що входять в неї.

4. Отримання в якості вихідних даних залежностей параметрів оптимізації від вартості [10]; ці залежності можуть бути представлені у виді формул, графіків чи таблиць.

5. Реалізація процедури послідовної оптимізації з вибором певного кроку  $\Delta$  в множині значень вартісних параметрів [8, 10].

Для цього використовується основний алгоритм для оптимального розподілу виділених коштів  $C_0$  між фазами обслуговування та алгоритм для оптимального розподілу коштів  $C_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), виділених у кожен фазу обслуговування, між параметрами оптимізації.

Розглянемо процедуру послідовної оптимізації. Нехай  $C_0$  – сума коштів, виділена на підвищення показника якості функціонування обладнання маршрута мережі зв'язку – ймовірності своєчасної доставки повідомлення  $P_{\text{св}}(t_d)$ , а  $C_i$  – частина цих коштів, виділена на модернізацію обладнання  $i$ -ї фази обслуговування. Як було зазначено вище, кожна з компонентів вектора  $X^i$  є однозначною функцією вартості, виділеною на поліпшення відповідного параметра оптимізації, тобто, якщо

$$C_i = \sum_{j=1}^{k_i} y_{ij},$$

то значення  $j$ -го параметра оптимізації при виділенні  $y_{ij}$  суми коштів на його поліпшення знаходяться із залежності:

$$x_j^i = \Psi_j^i(y_{ij}), j = \overline{1, k_i}.$$

Отже, основна задача полягає у визначенні оптимальних значень  $y_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ .

При кожному  $C_i$  значення  $y_{ij}$  можна визначити шляхом максимізації функції

$$\phi_i(C_i) = P_i(\Psi_1^i(y_{i1}), \Psi_2^i(y_{i2}), \dots, \Psi_{k_i}^i(y_{ik_i}))$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^{k_i} y_{ij} \leq C_i, y_{ij} \geq 0.$$

Екстремальні значення цільової функції даної задачі залежать від виділеної на модернізацію обладнання  $i$ -ї фази обслуговування вартості  $C_i$  [11, 12].

Отже, основна задача зводиться до визначення таких значень  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , які максимізують

$$\prod_{i=1}^n \max_{\sum_{j=1}^{k_i} y_{ij} \leq C_i, y_{ij} \geq 0} P_i(\Psi_1^i(y_{i1}), \Psi_2^i(y_{i2}), \dots, \Psi_{k_i}^i(y_{ik_i})) \quad (1)$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq C, C_i \geq 0. \quad (2)$$

Очевидно, логарифмуючи цільову функцію (1), можна звести ці задачі до максимізації

$$\sum_{i=1}^n \max_{\sum_{j=1}^{k_i} y_{ij} \leq C_i, y_{ij} \geq 0} \ln \left( P_i(\Psi_1^i(y_{i1}), \Psi_2^i(y_{i2}), \dots, \Psi_{k_i}^i(y_{ik_i})) \right) \quad (3)$$

Важливо зазначити, що функція максимізації

$$\phi_i(C_i) = \max_{\sum_{j=1}^{k_i} y_{ij} \leq C_i, y_{ij} \geq 0} P_i \left( \Psi_1^i(y_{i1}), \Psi_2^i(y_{i2}), \dots, \Psi_{k_i}^i(y_{ik_i}) \right) \quad (4)$$

має монотонність по  $C_i$ . Тоді одним з можливих підходів до розв'язання сформульованої задачі є пошук залежності  $\phi_i(C_i)$  з наступним розв'язком задачі максимізації

$$\prod_{i=1}^n \phi_i(C_i) \quad (5)$$

або максимізації

$$\sum_{i=1}^n \ln \phi_i(C_i) \quad (6)$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq C, C_i \geq 0. \quad (7)$$

Складність сформульованої задачі (5) – (7) у тому, що функції  $\phi_i(C_i)$  не мають простого аналітичного виду. Це – неявно задані функції щодо шуканих змінних  $C_i$ . Обчислення функцій  $\phi_i(C_i)$  рівносильно розв'язанню екстремальної задачі (4), алгоритм розв'язку якої буде розглянутий дещо нижче (алгоритм 2). Допустимо, що є можливість обчислювати  $\phi_i(C_i)$  при різних  $C_i$ . Тоді для розв'язку основної задачі (5) – (7) можна використати викладений нижче алгоритм 1.

Алгоритм 1. Розглянемо послідовний розподіл вартості  $C_0$  між фазами обслуговування: спочатку розподіляється деяка частина вартості  $\Delta$ , потім  $2\Delta$  і т.д. до того, як при черговому кроці  $s^*$  виявиться, що  $s^*\Delta = C_0$ . Відповідно до цього оптимальний розв'язок відшукується наступним чином.

Нехай початковий розв'язок

$$y(0) = (y_1(0), y_2(0), \dots, y_n(0)) = (0, 0, \dots, 0).$$

Перший крок: виділяємо частину вартості  $\Delta$ , обчислюємо  $Q_i(0) = \ln \phi_i(y_i(0) + \Delta)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , і знаходимо  $i^*$ , що максимізує це значення, тобто  $Q_{i^*}(0) = \max_{1 \leq i \leq n} \ln \phi_i(y_i(0) + \Delta)$ .

Збільшуючи відповідну компоненту вектора  $y(0)$  на  $\Delta$ , отримуємо нове наближення  $y(1)$  (після першого кроку).

Другий крок: виділяємо друге значення  $\Delta$  вартості, обчислюємо різницю:

$$Q_i(1) = \ln \phi_i(y_i(1) + \Delta) - \ln \phi_i(y_i(1)), i = \overline{1, n},$$

і знаходимо значення  $i^*$ , що максимізує цю різницю, тобто

$$Q_{i^*}(1) = \max_{1 \leq i \leq n} Q_i(1).$$

Далі збільшуємо відповідний компонент вектора  $y(1)$  на  $\Delta$  і отримуємо наступне наближення  $y(2)$  (після другого кроку) і т.д.

Нехай в  $s$ -й ітерації маємо наближення  $y(s)$ . Обчислюємо різницю

$$Q_i(s) = \ln \phi_i(y_i(s) + \Delta) - \ln \phi_i(y_i(s)), i = \overline{1, n},$$

і визначаємо  $i^*$  таке, що

$$Q_{i^*}(s) = \max_{1 \leq i \leq n} Q_i(s).$$

Збільшуючи відповідний компонент вектора  $y(s)$  на  $\Delta$  отримуємо  $y(s+1)$ . Процес зупиняється після тієї ітерації  $s^*$ , коли вперше буде  $s^*\Delta = C_0$ . При цьому отримуємо вектор  $y(s^*)$ :

$$y(s^*) = (y_1(s^*), y_2(s^*), \dots, y_n(s^*)),$$

$$\text{де } y_1(s^*) = C_1, y_2(s^*) = C_2, \dots, y_n(s^*) = C_n.$$

Важливо зазначити, що обґрунтування цього процесу засновано на монотонній залежності  $\ln \phi_i(C_i)$  відносно  $C_i$  [13, 14]. У даному алгоритмі передбачалася можливість обчислення функції  $\ln \phi_i((y_i)s)$  при значеннях  $(y_i)s$ , які зустрічалися в процесі ітерації. Для обчислення цих значень можна використати описаний нижче алгоритм 2, аналогічний алгоритму 1, спрямований на розв'язання задачі пошуку значень

$$\phi_i(C_i) = \max_{\sum_{j=1}^{k_i} y_{ij} \leq C_i, y_{ij} \geq 0} P_i \left( \Psi_1^i(y_{i1}), \Psi_2^i(y_{i2}), \dots, \Psi_{k_i}^i(y_{ik_i}) \right) \quad (8)$$

при заданих  $C_i$ . Зазначимо, що даний алгоритм дозволяє обчислювати  $\phi_i(\cdot)$  при будь-яких значеннях  $C_i$  зокрема, при тих значеннях, які зустрічалися в ході ітеративного процесу. Тому, ці два алгоритма доцільно комбінувати, звертаючись у ході ітеративного процесу алгоритму 1 до процедури обчислення  $\ln \phi_i(\cdot)$  відповідно алгоритму 2 при необхідних значеннях  $(y_i)s$ .

Алгоритм 2. Даний алгоритм спрямований на розв'язання екстремальної задачі (4), тобто він реалізує процедуру послідовного оптимального розподілу виділених коштів  $C_i$  між параметрами оптимізації  $x_j^i$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ , в  $i$ -й фазі обслуговування  $i = \overline{1, n}$ . Ця процедура представлена у вигляді багатокрокового обчислювального процесу.

Нехай  $\Delta$  – мінімальна одиниця розподілених коштів. Тоді, на першому кроці ми розподіляємо найліпшим чином  $\Delta$  кошти, на другому кроці –  $2\Delta$  кошти і т.д. до тих пір, поки не вичерпаємо всі виділені кошти  $C_i$ . Відповідно до цього формальна схема обчислювального процесу виглядає наступним чином.

$$\text{Нехай маємо початкове наближення: } y^i(0) = (y_1^i(0), y_2^i(0), \dots, y_{k_i}^i(0)) = (0, 0, \dots, 0).$$

На першому кроці обчислюємо:  $\gamma_i^l(0) = P_i \left( \Psi_1^i(0), \Psi_2^i(0), \dots, \Psi_{l-1}^i(0), \Psi_{l+1}^i(0), \dots, \Psi_{k_i}^i(0) \right)$  і знаходимо значення  $l^*$ , для якого  $\gamma_i^{l^*}(0) = \max_{1 \leq l \leq k_i} \gamma_i^l(0)$ . Збільшуємо на  $\Delta$  компоненту  $l^*$  вектора  $y^i(0)$ ,

тобто визначаємо  $\gamma_i^l(0) + \Delta$  та отримуємо наближення  $y^i(1)$  після першого кроку і т.д.

Після  $s$ -го кроку отримуємо наближення  $y^i(s) = (y_1^i(s), y_2^i(s), \dots, y_{k_i}^i(s))$ .

Далі на  $(s + 1)$ -ому кроці обчислюємо

$$\gamma_i^l(0) = P_i \left( \Psi_1^i \left( y_1^i(s) \right), \Psi_2^i \left( y_2^i(s) \right), \dots, \Psi_{l-1}^i \left( y_{l-1}^i(s) \right), \right. \\ \left. \Psi_l^i \left( y_l^i(s) + \Delta \right), \Psi_{l+1}^i \left( y_{l+1}^i(s) \right), \dots, \Psi_{k_i}^i \left( y_{k_i}^i(s) \right) \right)$$

і знаходимо максимум до  $l$  різниць

$$\gamma_i^l = \gamma_i^l(s) - P_i \left( \Psi_1^i \left( y_1^i(s) \right), \dots, \Psi_l^i \left( y_l^i(s) \right), \dots, \Psi_{k_i}^i \left( y_{k_i}^i(s) \right) \right), \quad (9)$$

який нехай досягається при  $l = l^*$ , тобто

$$\gamma_i^{l^*}(s) = \max_{1 \leq l \leq k_i} \left[ \gamma_i^l(s) - P_i \left( \Psi_1^i \left( y_1^i(s) \right), \dots, \Psi_l^i \left( y_l^i(s) \right), \dots, \Psi_{k_i}^i \left( y_{k_i}^i(s) \right) \right) \right]. \quad (10)$$

Збільшуючи на  $\Delta$  відповідний компонент  $y_{l^*}^i(s)$  вектора  $y^i(s)$ , отримуємо наближення  $y^i(s + 1)$  і т.д. до тих пір, поки не прийдемо до  $s^*$  ітерації, для якої  $s^* \Delta = C_i$ .

Вектор  $y^i(s^*)$  – шуканий розв’язок розглянутої задачі, причому

$$\phi_i(C_i) = P_i \left( \Psi_1^i \left( y_1^i(s^*) \right), \Psi_2^i \left( y_2^i(s^*) \right), \dots, \Psi_{k_i}^i \left( y_{k_i}^i(s^*) \right) \right),$$

де  $y_j^i(s^*)$  – оптимальна вартість, виділена на поліпшення параметра оптимізації  $x_j^i$ ,  $j = \overline{1, k_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Обґрунтування збіжності даного процесу, як і попереднього, впливає з монотонності функції  $P_i(\cdot)$  за змінними  $u_{ij}$ . Знаючи вихідні залежності, неважко визначити оптимальні значення параметрів оптимізації (чисельні значення функціональних та експлуатаційно-технічних параметрів обладнання), які забезпечують максимальне значення показника якості функціонування  $P_{\text{св}}(t_d)$  розглянутої ЕКМЗ. Якщо  $\max P_{\text{св}}(t_d)$ , отримано при виділеній сумі коштів  $C_0$ , і це не задовольняє заданій вимозі (тобто,  $\max P_{\text{св}}(t_d) < P_{\text{св}}^{\text{TP}}(t_d)$ ), то необхідно збільшити суму коштів  $C_0$  до необхідної величини та продовжити процес оптимізації до виконання умови:  $\max P_{\text{св}}(t_d) \geq P_{\text{св}}^{\text{TP}}(t_d)$ .

6. Розрахунок показників якості функціонування усіх маршрутів, які входять в інформаційні напрямки, і показника якості напрямку зв’язку.

### Висновки

В статті показано, що процес обґрунтування вимог до параметрів обладнання ЕКМЗ можна формалізувати як задачу математичного програмування, в якій цільова функція та функціональні обмеження є монотонними функціями своїх аргументів, а деякі змінні набувають дискретних значень. Це класична задача частково дискретного нелінійного програмування, для якої наразі не існує універсального аналітичного розв’язку.

Для розв’язку цієї задачі запропоновано метод, що заснований на використанні ідеї прямого пошуку, – метод послідовної оптимізації з вибором певного кроку в множині значень вартісних параметрів.

Метод передбачає ітеративну процедуру, на кожному кроці якої обмежений ресурс розподіляється між керованими змінними (параметрами оптимізації) таким чином, щоб забезпечити найбільше зростання цільової функції. Результатом є визначення оптимальних значень параметрів, які забезпечують екстремум показника якості. Використовуючи далі відомі (задані) залежності параметрів оптимізації від вартості, можна науково обґрунтувати кількісні вимоги до параметрів обладнання (функціональних і експлуатаційно-технічних) досліджуваної мережі зв’язку.

Напрямок подальших досліджень може бути інтеграція запропонованого методу у системи підтримки прийняття рішень.

### Література

1. Фещенко, А. Б., Загора, О. В., & Борисова, Л. В. (2022). Удосконалення імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. *Problems of Emergency Situations*, (1(35)), 120–132. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3901945>
2. Захаржевський, А. Г. (2023). Модель оцінювання якості функціонування системи керування інфокомунікаційною мережею спеціального призначення. *Зв’язок*, (5), 3–8. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.050308>
3. Лебеденко, Т. М., Головешко, М. В., & Северілов, А. В. (2019). Результати експериментального дослідження методу активного керування чергами на інтерфейсах телекомунікаційних мереж. *Проблеми телекомунікацій*, (2(25)), 37–55. <https://doi.org/10.30837/pt.2019.2.03>
4. Yakovyna, V. S., Seniv, M. M., & Symets, I. I. (2020). Sambir algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 163–177. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-16>

5. Єременко, О. С., & Мерсні, А. (2020). Підвищення відмовостійкості елементів сучасних інфокомунікаційних мереж із застосуванням протоколів резервування шлюзу за замовчуванням. *Проблеми телекомунікацій*, (2(27)), 68–81. <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>
6. Князева, Н., & Ненов, О. (2021). Оцінка структурної надійності телекомунікаційних мереж невизначеної топології на основі імітаційного моделювання. *Вісник Університету "Україна". Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика*, (2(23)).
7. Raghuvanshi, K., Agarwal, A., & Jain, K. (2021). A time-variant fault detection software reliability model. *SN Applied Sciences*, 3(18). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>
8. Кононова, І. В., & Некрутенко, В. І. (2024). Модель шляху інформаційного напрямку мережі зв'язку спеціального призначення з реальною надійністю обладнання. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74), 27–32. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/05>
9. Mogylevych, D., Kononova, I., Kredentser, V., & Karadschow, I. (2020). Comprehensive reliability assessment technique of telecommunication networks equipment with reducible structure. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка*, (80), 39–47. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>
10. Креденцер, Б. П., та ін. (2013). *Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація* (342 с.). Київ: Фенікс.
11. Льман, В. М., Михайлова, Т. Ф., & Самойлов, С. П. (2020). *Оптимізаційні методи і моделі* (240 с.). Дніпро: Дріант.
12. Ладієва, Л. Р. (2023). *Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень* (73 с.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
13. Корнієнко, В. І., та ін. (2017). *Теорія систем керування* (497 с.). Дніпро: НГУ.
14. Кузьмич, В. О., Молодід, О. К., & Тараненко, Р. А. (2020). *Методи дослідження операцій* (117 с.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.

#### References

1. Feshchenko, A. B., Zakora, O. V., & Borysova, L. V. (2022). Udoskonalennia imovimisnoi modeli tipovoho frahmenta vidomchoi tsyfrovoi telekomunikatsiinoi merezhi DSNS. *Problems of Emergency Situations*, (1(35)), 120–132. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3901945>
2. Zakhazhevskiy, A. H. (2023). Model otsiniuvannya yakosti funktsionuvannya systemy keruvannya infokomunikatsiinoiu merezheiu spetsialnogo pryznachennia. *Zviazok*, (5), 3–8. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2023.050308>
3. Lebedenko, T. M., Holoveshko, M. V., & Severilov, A. V. (2019). Rezultaty eksperymentalnogo doslidzhennia metodu aktyvnogo keruvannya cherhamy na interfeisakh telekomunikatsiinykh merezh. *Problemy telekomunikatsii*, (2(25)), 37–55. <https://doi.org/10.30837/pt.2019.2.03>
4. Yakovyna, V. S., Seniv, M. M., & Symets, I. I. (2020). Sambir algorithms and software suite for reliability assessment of complex technical systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 163–177. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-16>
5. Yeremenko, O. S., & Mersni, A. (2020). Pidvyshchennia vidmovostiikosti elementiv suchasnykh infokomunikatsiinykh merezh iz zastosuvanniam protokoliv rezervuvannya shliuzu za zamovchuvanniam. *Problemy telekomunikatsii*, (2(27)), 68–81. <https://doi.org/10.30837/pt.2020.2.06>
6. Kniazieva, N., & Nienov, O. (2021). Otsinka struktturnoi nadiinosti telekomunikatsiinykh merezh nevyznachenoї topolohii na osnovi imitatsiinoho modeliuвання. *Visnyk Universytetu "Ukraina". Serii: Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetyka*, (2(23)).
7. Raghuvanshi, K., Agarwal, A., & Jain, K. (2021). A time-variant fault detection software reliability model. *SN Applied Sciences*, 3(18). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04015-z>
8. Kononova, I. V., & Nekrutenko, V. I. (2024). Model shliakhu informatsiinoho napriamku merezhi zviazku spetsialnogo pryznachennia z realnoiu nadiiinistiю obladnannia. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 35(74), 27–32. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/05>
9. Mogylevych, D., Kononova, I., Kredentser, V., & Karadschow, I. (2020). Comprehensive reliability assessment technique of telecommunication networks equipment with reducible structure. *Visnyk NTUU "KPI". Serii Radiotekhnika*, (80), 39–47. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.39-47>
10. Kredentser, B. P., та ін. (2013). *Надійність систем з надлишковістю: методи, моделі, оптимізація* (342 с.). Київ: Фенікс.
11. Лман, В. М., Михайлова, Т. Ф., & Самойлов, С. П. (2020). *Оптимізаційні методи і моделі* (240 с.). Дніпро: Дріант.
12. Ладієва, Л. Р. (2023). *Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень* (73 с.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
13. Корнієнко, В. І., та ін. (2017). *Теорія систем керування* (497 с.). Дніпро: НГУ.
14. Kuzminykh, V. O., Molodid, O. K., & Taranenko, R. A. (2020). *Metody doslidzhennia operatsii* (117 s.). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.