

УДК 621.391

# ЗАСТОСУВАННЯ ЕВРИСТИЧНОЇ ПРОЦЕДУРИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДО ВИБОРУ ВАРІАНТА МОВНОГО КОДЕКУ В IP-МЕРЕЖІ



[Л.І. Мельнікова](#), [О.В. Лінник](#), [Н.В. Кривошапка](#), [В.А. Барсук](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Abstract** – A procedure for multi-criteria selection of optimal design solutions is proposed, taking into account the set of contradictory indicators of designed telecommunication system quality. In the procedure, the formal numerical method of weighting factors for solving the MCO problem is supplemented with an informal procedure by the method of narrowing the Pareto set for choosing the only best solution using additional expert information from a decision maker (DM). The inclusion of the decision maker in the interactive mode allows to refine the solution and bring it closer to the goal. In contrast to formal numerical methods, this allows changing the values of some partial criteria in dynamics to achieve the required quality of the optimized system. The problem of choosing a speech codec for IP networks is solved using the proposed procedure. The selection of a set of partial criteria has been substantiated. Solutions are obtained for different values of the weights of partial criteria with the involvement of a decision maker. The results obtained allow to conclude that the proposed procedure can be used by popular IP-PBXs when justifying the choice of an optimal codec version for the user.

**Анотація** – Запропоновано процедуру багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень з урахуванням сукупності суперечливих показників якості функціонування проектованої телекомунікаційної системи. У процедурі формальний чисельний метод вагових множників рішення задачі багатокритеріальної оптимізації (БКО) доповнюється неформальною процедурою методом звуження множини Парето для вибору єдиного найкращого рішення з використанням додаткової експертної інформації від особи, що приймає рішення (ОПР). Розглядаються наступні випадки наявності апріорної інформації про важливість показників: задана вага показників; задана зіставна важливість показників; відсутня інформація про важливість показників. Алгоритм, за допомогою якого відшукується рішення задачі вибору, враховує роль кожного часткового критерію з точки зору його впливу на властивості системи в цілому за допомогою вагових коефіцієнтів. На відміну від формальних чисельних методів це дозволяє змінювати значення деяких часткових критеріїв в динаміці для досягнення необхідної якості оптимізованої системи. Розв'язана задача вибору мовного кодеку для IP-мереж з використанням запропонованої процедури.

## Вступ

Інтенсивний розвиток і важливість галузі телекомунікацій, інформаційної інфраструктури, конкуренція в цій сфері змушують операторів зв'язку використовувати нові оптимальні засоби телекомунікацій у плануванні, розвитку і модернізації мереж різного призначення при суворому обліку сукупності техніко-економічних вимог [1]. При цьому виникає необхідність застосування оптимального підходу не тільки до побудови мереж зв'язку, а й до організації бізнес-процесів у цих мережах, зокрема, в білінгових системах, системах обслуговування користувачів, системах управління мережними ресурсами, фінансових та обчислювальних системах. Системи підтримки прийняття рішень (СППР) при багатьох критеріях у бізнес-процесах мають сьогодні особливу важливість для операторів зв'язку, тому що вони допомагають збільшити конкурентоздатність 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 задачі проектування телекомунікації зазвичай вирішувалися в основному з використанням методів однокритеріальної оптимізації. Зокрема, це завдання переходу з мідної на оптоволоконну технологію й аналізу розвитку мереж, вибору оптимальних маршрутів і визначення мінімальної швидкості передачі, вибору архітектури мереж, розподілення каналів, розташування супутників [1-7].

Фундаментальною проблемою в таких завданнях проектування є обчислювальна складність прийняття рішень для таких змішаних (бінарно-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 у розробці з'єднань між комутованими базами [1].

Аналіз розглянутих задач оптимізації в телекомунікаціях дозволяє виділити ряд особливостей таких завдань:

- складність формального опису;
- різноманіття показників якості;
- суперечливість (антагоністичність) показників;
- суб'єктивізм вимог до якості; невизначеність вихідних даних.

Це визначає необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації (БКО) при виборі бажаних рішень з множини допустимих варіантів.

Багатокритеріальний аналіз і оптимізація має переваги над однокритеріальною оптимізацією й інтенсивно розвивається в різних технічних додатках. Однак ці методи ще не є загальноприйнятими та широко відомими серед розробників, які працюють у галузі телекомунікацій. Ще одна причина полягає в тому, що проектувальники ще не повністю реалізують постійно зростаючі можливості сучасних комп'ютерів. Раніше багатокритеріальний аналіз неможливо було застосувати щодо великих розмірностей мережних моделей, оскільки обчислювальний процес оптимізації займав багато часу. Тепер це обмеження не таке жорстке, і багатокритеріальний аналіз може бути використаний у телекомунікаціях у задачах підтримки стратегічного управління, планування мереж, організації мережної маршрутизації.

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

## І. Евристична процедура розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації

Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації широко використовуються методи, засновані на зведенні задачі багатокритеріальної оптимізації до задачі однокритеріальної оптимізації. Найбільшого поширення набула оптимізація за Парето. Вибір певної точки з множини Парето еквівалентний визначенню ваги для кожного з часткових критеріїв оптимальності. На цьому факті засновано велику кількість чисельних методів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації. Значення вагових коефіцієнтів є додатковою і невизначеною інформацією в рішенні задач БКО.

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

*Ситуація 1* – відомі кількісні значення вагових коефіцієнтів часткових критеріїв.

*Ситуація 2* – кількісні значення вагових коефіцієнтів невідомі, але є інформація, що дозволяє ранжувати окремі критерії за важливістю, далі ранги перераховуються у вагові коефіцієнти за певними формулами.

*Ситуація 3* – немає ні кількісної, ні якісної інформації про коефіцієнти, у цьому випадку не слід віддавати перевагу якомусь критерію і логічно використовувати схему рівності або квазірівності критеріїв.

Одним з варіантів отримання рішення задачі в умовах невизначеності вагових коефіцієнтів є залучення особи, яка приймає рішення (ОПР). ОПР вирішує два завдання. По перше, залежно від ситуації встановлює значення вагових коефіцієнтів. По-друге, аналізуючи рішення, отримане одним з чисельних методів, може змінювати діапазон значень кожного критерію в залежності від цілей БКО, тобто змінювати область Парето. Включення ОПР в інтерактивному режимі дозволяє уточнювати рішення задачі та наближати його до поставленої мети.

Далі викладено процедуру багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень з урахуванням сукупності суперечливих показників якості із залученням додаткової інформації від ОПР.

Нехай є множина  $I$  варіантів вирішення завдання БКО (множина Парето), потужність якого дорівнює  $n$ . Якість кожного  $i$ -го варіанту оцінюється вектором часткових критеріїв  $K_i = [K_{ij}]$ , в якому  $K_{ij}$  – значення  $j$ -го часткового критерію для  $i$ -го варіанту системи.

Потрібно визначити варіанти  $I^* \subset I$ , при яких забезпечуються задовільні значення всіх  $m$  показників  $K_i$ , та найкращий компроміс між ними з урахуванням влас-

тивостей множини варіантів розв'язання й апріорної інформації про співвідношення важливості показників. Розглядаються наступні випадки наявності апріорної інформації про важливість показників: задана вага показників; задана зіставна важливість показників; відсутня інформація про важливість показників.

Алгоритм, за допомогою якого відшукується розв'язок задачі вибору, враховує роль кожного часткового критерію з точки зору його впливу на властивості системи загалом за допомогою вагових коефіцієнтів або коефіцієнтів важливості  $P_j$ , причому

$\sum_{j=1}^m P_j = 1$ . Функція корисності для кожного варіанта  $I_i \in I$  задається у вигляді узагаль-

неного адитивного критерію:

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

де  $i = \overline{1, n}$  – номер варіанту системи;  $j = \overline{1, m}$  – номер часткового критерію;  $q_{ij} = \varepsilon_{ij}(K_{ij})$  – функція корисності  $j$ -го часткового критерію в  $i$ -му варіанті системи.

Для вирішення цього завдання необхідно обґрунтувати вид функції корисності часткових критеріїв. Функція корисності часткових критеріїв повинна бути універсальною та добре пристосованою до врахування особливостей конкретних систем, їх цілей і критеріїв. Для цього вона повинна відповідати наступним вимогам: бути безрозмірною; мати одиничний інтервал вимірювання  $(0, 1)$ ; бути інваріантною до виду екстремуму окремого критерію (**min** або **max**), тобто найкращому значенню має відповідати значення 1, а найгіршим – 0; дозволяти реалізувати характерні нелінійні залежності. Один з можливих видів такої функції наведено у [8]. Зазначеним вимогам відповідає функція виду:

$$\varepsilon_{ij}(K_{ij}) = \left( \frac{K_{ij} - K_{jнз}}{K_{jнк} - K_{jнз}} \right), \quad (2)$$

де  $K_{jнк}$ ,  $K_{jнз}$  – його найкраще та найгірше значення, що відповідають межах області допустимої зміни відповідних параметрів.

Функція корисності (2) характеризує ступінь наближеності до локального оптимуму за критерієм  $K_j$ . Для визначення меж наближеності області компромісів  $X$ , тобто значень  $K_{jнк}$  і  $K_{jнз}$ , користуються таким методом [5]. На множині допустимих рішень  $X$  проводять оптимізацію по кожному з часткових критеріїв  $K_j$ , в результаті визначається екстремальне за даним критерієм рішення

$$X_j^0 = \mathbf{arg} \underset{x \in X}{extr} K_j(x), j = \overline{1, m} \quad i = \overline{1, n} \quad (3)$$

і відповідні йому значення всіх часткових критеріїв.

$$\text{Тоді } K_{j_{нк}} = K_j(X_j^0), \text{ а } K_{j_{нз}} = \begin{cases} \max_i K_{ij}(x_j^0), K_j(x) \rightarrow \min; \\ \min_i K_{ij}(x_j^0), K_j(x) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4)$$

Таким чином,  $K_{j_{нк}}$  і  $K_{j_{нз}}$ ,  $i = \overline{1, n}$  є межами відображення наближеної області компромісів на простір часткових критеріїв.

Визначення вагових коефіцієнтів стикається із 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 у вагові коефіцієнти за певними формулами. У разі ж, коли ОПР не має ні кількісної, ні якісної інформації про коефіцієнти, логічно використовувати «рівність» критеріїв.

Пошук оптимального рішення проводиться за такою процедурою:

1. Досліджується множина всіх варіантів  $I$  та проводиться оптимізація за кожним з показників  $K_{ij}$ . Отримані максимуми утворюють вектор  $Z$ . Цей вектор містить «найкращі» значення часткових критеріїв по всій множини варіантів  $I$  та використовується далі ОПР для прийняття рішення.

2. Проводиться оптимізація за сумарним критерієм  $Q_i$ . Найбільшим значенням  $Q_i = \max\{Q_i\}$  відповідає варіант системи з параметром  $I_l \in I$ , значення часткових критеріїв для  $l$ -го варіанту записується у вигляді вектору  $Y$ , який пред'являється ОПР як рішення:

$$Y = \begin{bmatrix} K_{l1} \\ \vdots \\ K_{lm} \end{bmatrix}.$$

3. Перед ОПР ставиться питання, чи всі показники мають задовільне значення. При відповіді на це питання використовується вектор  $Z$ . У разі негативної відповіді ОПР виділяє частковий критерій з номером  $r$ , який має найменш задовільне значення, а також вказує таку його величину  $C_r$ , що значення показника  $r$  можна вважати задовільним.

4. Визначається нове значення  $I^* = \{I_i | K_{ir} \leq C_r (K_{ij} \rightarrow \max) \vee (K_{ir} \geq C_r (K_{ij} \rightarrow \min))\}$ .

У множині  $I^*$  повторюється крок 1, в результаті чого оновлюється вектор максимальних значень критеріїв  $Z$ .

Перед ОПР ставиться питання, чи припустимо зменшення максимально можливих значень часткових критеріїв, яке виникає при переході від попереднього значення вектору  $Z$  до оновленого. У разі негативної відповіді необхідно змінити значення  $C_r$ , прийняте за задовільне, на менш задовільне. Далі повторюються всі етапи, починаючи з п.4. Даний етап призводить до вибору компромісного значення  $C_r$ , яке на подальших етапах залишається незмінним.



5. Для множини  $I^*$  проводиться оптимізація за сумарним критерієм (1), яка призводить до визначення вектору  $Y$ , передбачуваного ОПР як кінцеве рішення. Процедура закінчується тоді, коли на питання п.3 було отримано позитивну відповідь.

## II. Багатокритеріальний вибір оптимальних варіантів мовних кодеків

Розглянемо особливості застосування евристичної процедури БКО для вибору варіанту мовного кодека з урахуванням сукупності показників якості. Вибір оптимального алгоритму кодування/декодування мовної інформації кодека є одним з основних чинників якості IP-каналу. В голосових шлюзах IP-телефонії поняття кодека має на увазі не тільки алгоритми кодування/декодування, але також їх апаратну реалізацію. На якість аудіосигналів безпосередньо впливають такі фактори як втрата і затримка пакетів, смуга пропускання каналу передачі даних і власне VoIP-кодеки, які по-різному справляються з цими факторами. Здебільшого вони в більшій чи меншій мірі стійкі до втрати пакетів та їх затримки і забезпечують різну ступінь стиснення інформації. Тому, щоб досягти високої якості зв'язку, потрібно правильно підібрати аудіокодек [9]. Розглянемо найбільш поширені варіанти, які використовуються в сучасній IP-телефонії.

Більшість кодеків, що застосовуються в IP-телефонії, описані рекомендаціями сімейства «G» стандарту H.323. Варто зазначити, що найбільш популярні IP-АТС працюють з усіма перерахованими аудіокодеками, і дозволяють користувачам самостійно вибирати оптимальний для них варіант. Як показники якості обрані основні технічні характеристики мовних кодеків, що характеризують їх споживчі властивості, зокрема, швидкість кодування, оцінка якості мови, складність реалізації, розмір кадру, сумарна затримка. У табл. 1 наведено показники якості для деякої множини різних типів мовних кодеків. З таблиці видно, що ці показники пов'язані між собою і мають конкуруючий характер. При переході від одного кодека до іншого поліпшенню одного показника якості відповідає погіршення іншого показника.

Найбільш широко використовувана методика оцінки якості передачі мови описана в Рекомендації ITU-T P.800 і відома як методика MOS (Mean Opinion Score). Модель MOS не враховує ряд явищ, що є типовими для пакетних мереж і які впливають на якість мови. У моделі MOS відсутня можливість кількісно врахувати фактори, що впливають на якість мови. Зокрема, не враховуються: наскрізна (end-to-end) затримка між мовцем по телефону і слухачем, вплив варіації затримки та вплив втрат пакетів. Крім того, модель MOS представляє оцінку якості в однібічному з'єднанні, а не в двох напрямках реального телефонного з'єднання. Все це вимагало розробки нових моделей оцінки якості передачі мови, що враховують особливості пакетних мереж. Такими є E-моделі, засновані на методі коефіцієнтів зниження якості обладнання, за яким слідує попередні моделі рейтингу передачі. Метод був розроблений групою ETSI [10].

Таблиця 1. Показники якості мовних кодеків

Тип кодека	Швидкість кодування, Кбіт/с	Оцінка якості, MOS (1÷5)	Складність реалізації, MIPS	Розмір кадру, мс	Сумарна затримка, мс
G.711	64	3,83	11,95	0,125	60
G.721	32	4,1	7,2	0,125	30
G.722	48	3,83	11,95	0,125	31,5
G.722(a)	56	4,5	11,95	0,125	31,5
G.722(b)	64	4,13	11,95	0,125	31,5
G.723.1(a)	5,3	3,6	16,5	30	37,5
G.723.1	6,4	3,9	16,9	30	37,5
G.726	24	3,7	9,6	0,125	30
G.726(a)	32	4,05	9,6	0,125	30
G.726(b)	40	3,9	9,6	0,125	30
G.727	24	3,7	9,9	0,125	30
G.727(a)	24	3,7	9,9	0,125	30
G.727(b)	40	3,9	9,9	0,125	30
G.728	16	4	25,5	0,625	30
G.729	8	4,05	22,5	10	35
G.729a	8	3,95	10,7	10	35

Для оцінки якості передачі основних кодеків, що застосовуються в IP-телефонії, була використана E-модель, яка рекомендується стандартами. Якість передачі мовної інформації визначається коефіцієнтом рейтингу передачі, так званим R-фактором, який об'єднує всі параметри, що мають відношення до з'єднання. За допомогою E-моделі були отримані оцінки якості передачі мови для деяких кодеків, а також побудовані залежності R-фактора від імовірності втрати пакета та затримки. Аналіз залежностей дозволяє сформулювати рекомендації щодо використання кодеків, але вибрати один варіант при заданих вимогах дуже складно [11].

Для вирішення такого завдання використовувалася евристична процедура розв'язання задачі БКО. Як часткові критерії обрані 4 параметра: швидкість кодування, оцінка якості передачі мови, складність реалізації, сумарна затримка. Оцінки якості передачі мови визначаються коефіцієнтом рейтингу передачі, R-фактором, отриманим із застосуванням E-моделі. У табл. 2 та 3 наведені окремі критерії та вихідні дані задачі БКО для 5 найбільш популярних в IP-телефонії кодеків. Були розглянуті варіанти вирішення завдання з відомими вагами часткових критеріїв. Важливість критеріїв визначає додаткову інформацію та задає умови вибору. Протокол одного варіанта рішення наведено в табл. 4. Результати рішення наведені в табл. 5

Таблиця 2. Опис часткових критеріїв

Число критеріїв $m=4$		
Назви критеріїв:		
1. Швидкість кодування		
2. Оцінка якості		
3. Складність реалізації		
4. Сумарна затримка пакетів		
Число векторів (варіанти кодеків) $n=5$		
ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИТЕРІЇВ		
Номер критерію	Вид екстремума	Вага
1	<b>max</b>	0,4
2	<b>max</b>	0,25
3	<b>min</b>	0,15
4	<b>max</b>	0,2

Таблиця 3. Вихідні дані задачі БКО

Тип кодека	Швидкість кодування, Кбіт/с	Оцінка якості, MOS (1÷5)	Складність реалізації, MIPS	Сумарна затримка, мс
G.711	64	93,4	11,95	60
G.726	32	91,4	9,6	30
G.729	8	83,4	22,5	35
G.723.1	6,4	78,4	16,9	37,5
G.728	16	86,4	25,5	30

Таблиця 4. Протокол діалогу ОПР

<p>ПРОТОКОЛ ДІАЛОГУ ОПР</p> <p>ОПР обрала режим роботи при відомій вазі кожного критерію.                  ЧИСЛО ВАРІАНТІВ, ЯКІ НЕ ПОКРАЩУЮТЬСЯ = 5</p> <p>Швидкість передачі                  = 64.000000</p> <p>R-фактор                  = 93.400000</p> <p>Складність реалізації                  = 9.6000000</p> <p>Затримка                  = 30.000000</p> <p>оптимальний варіант номер 1</p> <p>1 Швидкість передачі                  = 64.000000</p> <p>2 R-фактор                  = 93.400000</p> <p>3 Складність реалізації                  = 11.95000000</p> <p>4 Затримка                  = 60.000000</p> <p>Чи всі критерії мають задовільне значення? (y/n)</p> <p>y</p>
---



Таблиця 5. Результати рішення задачі БКО

Номер критерію	Вага критеріїв					
	1	2	3	4	5	6
1	0,4	0,3	0,2	0,3	0,15	0,25
2	0,25	0,25	0,4	0,3	0,25	0,25
3	0,15	0,15	0,1	0,2	0,3	0,25
4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,25
Рішення	G.711	G.726	G.726	G.726	G.726	G.711

## Висновки

Проведено аналіз деяких оптимізаційних задач, які розв'язуються в телекомунікаційних системах. Виділені особливості таких задач, до яких варто віднести складність формального опису; різноманіття та суперечливість (антагоністичність) використаних показників якості; суб'єктивізм вимог до рівня якості рішень; невизначеність вихідних даних. На основі проведеного аналізу встановлена необхідність застосування методів багатокритеріальної оптимізації при виборі шуканих рішень з множини допустимих варіантів.

Запропонована евристична процедура багатокритеріального вибору оптимальних проектних рішень з урахуванням сукупності суперечливих показників якості. Ця процедура являє собою взаємопов'язану сукупність формалізованих методів задавання критерію оптимальності проектованої системи, формування вихідної множини проектних рішень, знаходження підмножини Парето-оптимальних рішень, а також звуження цієї підмножини до єдиного кращого проектного варіанту системи із залученням додаткової інформації від експертів.

З використанням запропонованої евристичної процедури рішення задачі БКО вирішено задачу вибору кодека в IP-мережі, обґрунтовано вибір множини часткових критеріїв оптимізації, визначені значення часткових критеріїв для кожного варіанту рішення, отримано оптимальне рішення при різних значеннях ваги часткових критеріїв в інтерактивному режимі із залученням ОПР. Показано, що використання запропонованої евристичної процедури для уточнення рішення із залученням ОПР дозволяє, на відміну від числових методів в динаміці, змінювати значення часткових критеріїв з метою досягнення необхідної якості функціонування системи, що оптимізується.

## Список літератури:

1. Безрук, В. М., Чеботарева, Д. В., Скорик, Ю. В. (2017), Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций: монографія, Харьков: ФОП Коряк С.Ф., 268 с.
2. Melnikova, L., Linnyk, E., Ageyev, D., Melnikova, O., Kryvoshapka, N., Barsouk, V. (2019), "Minimizing the Route of Sink Node in Wireless Sensor Network", Proceedings of the 2019 IEEE

International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), P. 861-864. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061563>

3. Loshakov, V. A., Popovsky, V. V., Saburova, S. O., Shostko, I. S., Oshepkov, M. Y., Popovskaya, K. O., Melnikova, L. I. (2019), System and Technologies of Digital Television: manual for graduate students, Under general editorship of Loshakov V.A. Kharkiv, Company "SMIT", 472 p.

4. Мельникова, Л. И., Линник, Е. В., Кривошапка, Н. В., Барсук, В. А. (2019), "Оптимизация маршрута мобильного стока в беспроводной сенсорной сети", Проблемы телекоммуникаций, No. 1(24). С. 104-112. Режим доступа: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/191\\_melnykova\\_optim.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/191_melnykova_optim.pdf)

5. Кутафин, А., Некрылов, Д. "Анализ перспектив применения математического аппарата многокритериального анализа к задаче автоматической маршрутизации в телекоммуникационных сетях", режим доступа: <http://www.pandia.ru/text/77/132/330.php>

6. Бухаров, А. С., Барсук, В. А., Кривошапка, Н. В. (2020), "Использование многокритериального подхода к оптимизации ТКС", XXIV международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», No. 10, С. 47-48.

7. Методи наукових досліджень в телекомунікаціях (2013), під ред. В. В. Поповського, Т. 2.: навчальний посібник, Х.: Компанія СМІТ, 330 с.

8. Петров, Э. Г., Пискланова, В.П., Бескорвайный, В.В. (1992), Территориально распределенные системы обслуживания, К.: Техніка, 208 с.

9. Гольдштейн, В. С., Пинчук, А. В., Суховицкий, А. Л. (2014), IP-телефония, СПб.: БХВ-Петербург, 336 с.

10. ITU-T Rec. G.107 (2014), The E-model: a computational model for use in transmission n planning, available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201506-I/en>

11. Бухаров, А. С., Тарасов, Р. А. (2019), "Оценка качества речи в телемедицинских сетях", XXVII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии: Наука, техника, технология, образование, здоровье» (MicroCAD 2019), Харків: НТУ «ХПІ», С. 31.