

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР «МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ»

НАУКОЄМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ В ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Колективна монографія

Під загальною редакцією
В.М. Безрука, Л.С. Глоби, О.Є. Стрижака

Київ

2019

УДК 621.391+004.7

НЗ4

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного центру «Мала академія наук України» (протокол № 1 від 15 січня 2019 року), науково-технічною радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 2 від 25.06.2018 р.)

Рецензенти:

Бараннік В.В., д.т.н., проф., начальник кафедри бойового застосування та експлуатації АСУ Харківського Національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба; Климаш М.М., д.т.н., проф., завідувач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

НЗ4

Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах : монографія / Під загальною редакцією В.М. Безрука, Л.С. Глоби, О.Є. Стрижака. – К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 194 с.
ISBN 978-617-7734-02-3

В монографії викладені сучасні результати досліджень ряду авторів з наукоємних технологій оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах. Розглядаються особливості методів багатокритеріальної оптимізації систем з урахуванням сукупності показників якості, а також особливості та результати вирішення задач управління при передачі та обробці інформації для різних типів інфокомунікаційних мереж.

УДК 621.391+004.7

© Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019

© Харківський національний університет радіоелектроніки, 2019

© Національний центр «Мала академія наук України», 2019

ISBN 978-617-7734-02-3 © Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019

ЗМІСТ

	Вступ	4
1	МЕТОДИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М.</i>	7
2	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ПРОЕКТНИХ ВАРІАНТІВ ПРИ ПЛАНУВАННІ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М., Чеботарьова Д.В.</i>	27
3	ВИБІР ПЕРЕВАЖНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ <i>Безрук В.М., Власова В.О., Скорик Ю.В.</i>	47
4	БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМАЛЬНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ <i>Безрук В.М., Гальченко К.Р.</i>	83
5	КЕРУВАННЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ <i>Скулиш М.А., Суліма С.В.</i>	97
6	ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕНЬ У ДАТА-ЦЕНТРИ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ <i>Гвоздецька Н.А., Глоба Л.С., Прокопець В.А., Степурін О.В.</i>	127
7	ДИНАМІЧНИЙ РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ У ВІРТУАЛІЗОВАНИЙ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ОПЕРАТОРА УКРАЇНИ З ПІДВИЩЕННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ДАНИХ <i>Гвоздецька Н.А., Глоба Л.С., Прокопець В.А.</i>	151
8	МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ХЕНДОВЕРУ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ <i>Глоба Л.С., Кірюшкін Р.О., Курдеча В.В.</i>	177

ВСТУП

Інфокомунікації – сучасна концепція конвергентної взаємодії телекомунікацій та інформаційних технологій з метою забезпечення своєчасної якісної передачі та обробки інформації.

Із впровадженням у світі технологій 4G LTE та розвитком тенденції переходу до технологій 5G постає питання збільшення швидкості та ефективності передачі та обробки даних. Все більшого поширення набувають сервіси Internet of Things (Інтернет речей) та сервіси міжмашинної взаємодії (M2M). Ці сервіси продукують великі масиви даних у режимі реального часу, що тягне за собою появу концепції BigData. Поряд із цим у світі гостро стоїть проблема економії електроенергії, що наразі споживається центрами обробки даних у величезних обсягах.

Такі виклики сучасного світу інфокомунікацій спричиняють необхідність пошуку нових наукоємних технологій оптимізації та управління при вирішенні задач планування та проектування інфокомунікаційних мереж. В монографії викладені деякі сучасні результати досліджень ряду авторів з питань оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах з урахуванням сукупності техніко-економічних вимог, включаючи швидкість передачі та обробки даних, енергоефективність, оптимальне використання ресурсів та інше. Це визначає актуальність опублікування даної колективної монографії, в якій викладені деякі результати досліджень авторів по вирішенню задач оптимізації та управління в інфокомунікаційних мережах з використанням сучасного математичного апарату та високоефективних обчислювальних засобів. Кожен розділ монографії являє собою завершене викладення результатів досліджень, отриманих авторами цього розділу.

Матеріали 1 розділу підготував Безрук В.М. У цьому розділі розглядаються деякі особливості методів багатокритеріальної оптимізації, що використовуються при розв'язанні різних типів задач оптимізації проектних рішень у мережах зв'язку з урахуванням сукупності показників якості. Наведено методи вирішення багатокритеріальних задач оптимізації при застосуванні безумовного критерію переваги, що приводить до отримання підмножини Парето-оптимальних рішень на множині допустимих варіантів. Для звуження підмножини Парето до єдиного переважного проектного варіанту застосовується умовний критерій переваги. Розглянуто різні методи формування умовного критерію переваги з урахуванням додаткової інформації від експертів, що дають можливість звуження підмножини Парето до єдиного переважного рішення. У наступних розділах 2 – 4 наводяться деякі приклади, що ілюструють практичні особливості використання розглянутих методів при багатокритеріальному аналізі і виборі оптимальних проектних варіантів для різних засобів зв'язку.

Матеріали 2 розділу підготували Чеботарьова Д.В., Безрук В.М. У цьому розділі розглянуто особливості застосування методів багатокритеріальної

оптимізації на етапі номінального планування радіомережі системи стільникового мобільного зв'язку (СМЗ) 2-го та 3-го покоління. Вирішена задача оптимізації радіомережі СМЗ як задача дискретного вибору Парето-оптимальних проектних варіантів при врахуванні сукупності показників якості. Розглянуто також особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації при номінальному плануванні транспортної мережі СМЗ. Наведені результати вибору оптимальної топології транспортної мережі СМЗ з урахуванням сукупності показників якості.

Матеріали 3 розділу підготували Безрук В.М., Скорик Ю.В., Власова В.О. У даному розділі розглянуто особливості вибору переважного проектного варіанту з урахуванням сукупності показників якості при застосуванні умовного критерія переваги, що заснований на використанні методу аналізу ієрархій (МАІ). Цей метод полягає в отриманні суджень експертів по парним порівнянь різних елементів проблеми вибору. В результаті обробки цих даних за строго формалізованими процедурами обчислюється вектор глобальних пріоритетів, компоненти якого визначають пріоритетність вибору переважного варіанту системи. Досліджено практичні особливості застосування МАІ для вибору переважного варіанту на прикладі різних типів засобів зв'язку, зокрема, мовних кодеків для ІР телефонії, системи масового обслуговування заявок у вузлах комутації мережі, проектних варіантів систем мобільного зв'язку 3-го покоління, технологій мобільного зв'язку 4-го покоління, типів мобільних телефонів, протоколів маршрутизації в ad-hoc мережах, модуляції в цифрових системах зв'язку, систем телевізійного мовлення стандартів DVB-T і ATSC, протоколів маршрутизації в бездротовій сенсорно-актуаторній мережі.

Матеріали 4 розділу підготували Безрук В.М., Гальченко К.Р. У даному розділі розглядаються особливості математичного формулювання та вирішення задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Оскільки, практичні умови роботи мереж зв'язку вимагають врахування декількох показників якості (метрик) при виборі оптимальних маршрутів, тому розглянуто багатокритеріальний підхід до вирішення задач оптимальної маршрутизації у мережах зв'язку. Наведено метод формування підмножини Парето-оптимальних варіантів маршрутизації, що дають можливість організації багатошляхової маршрутизації у мережі зв'язку. Наводиться приклад вирішення задачі оптимальної маршрутизації у мультисервісній мережі зв'язку з урахуванням сукупності показників якості.

Матеріали 5 розділу підготували Скулиш М.А., Суліма С.В. У даному розділі запропоновано алгоритм оптимального розподілу ресурсів у віртуалізованих мережах. Метою алгоритму надання ресурсів є виділення достатньої їх кількості для мережевих функцій, так що їх SLA можна задовольнити навіть у присутності пікового навантаження. В основі будь-якого алгоритму надання ресурсів лежать два питання: скільки ресурсів надавати і коли. Ці питання глибоко досліджуються авторами розділу.

Матеріали 6 розділу підготували Глоба Л.С., Степурін О.В., Гвоздецька Н.А., Прокопеч В.А. У даному розділі запропоновано підхід до підвищення енергоефективності обчислень для серверного кластера як інформаційно-телекомунікаційної одиниці інфраструктури ЦОД, який відрізняється одночасним врахуванням параметрів енергоефективності та продуктивності при розподілі задач. Розроблено алгоритм підвищення енергоефективності обчислень на основі запропонованого підходу, який складається з етапу попередньої індивідуальної атестації серверного кластера та етапу енергоефективного розподілу задач. Врахування індивідуальних залежностей енергоспоживання серверів від їх завантаженості є основною відмінною рисою запропонованого підходу.

Матеріали 7 розділу підготували Глоба Л.С., Прокопеч В.А., Гвоздецька Н.А. У даному розділі проаналізовано ефективність методу динамічного розподілу ресурсів у віртуалізованій мережі мобільного оператора України з використанням механізмів підвищення енергоефективності обробки даних. Основною метою методу динамічного розподілу ресурсів є підтримка обсягу ресурсів, достатнього для виконання вимог SLA (Service Level Agreement – Угода про рівень обслуговування) при уникненні надмірності. Це дозволяє більш ефективно використовувати апаратні ресурси для економії електроенергії та зменшення викидів CO₂. Ефективність методу перевірено для віртуалізованого ядра EPC (Evolved Packet Core) мережі мобільного зв'язку України. Для додаткового підвищення енергоефективності обробки даних у дослідженні застосовано підхід PCPB (Power Consumption and Performance Balance), який запропоновано у розділі 6.

Матеріали 8 розділу підготували Кірюшкін Р.О., Курдеча В.В., Глоба Л.С. У даному розділі проведено огляд основних методів вертикального хендвера та зроблений висновок про неефективність існуючих рішень у бездротових гетерогенних мережах з багатокласовими груповими викликами мобільних вузлів. Описано модифікацію методу вертикального хендвера за рахунок зміни алгоритму прийняття рішень для різних типів викликів мобільного вузла що дозволило підвищити ефективність зв'язку у гетерогенних безпроводових мережах. Розглянуто створену математичну модель алгоритму прийняття рішення, який застосовує методи TOPSIS і MULTIMOORA. Проведено імітаційне моделювання методу прийняття рішення, який базується на запропонованій математичній моделі та доведено його ефективність у гетерогенних бездротових мережах.

3. ВИБІР ПЕРЕВАЖНИХ ВАРІАНТІВ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Безрук В.М., Власова В.О., Скорик Ю.В.

При проектуванні систем і мереж зв'язку потрібно вибирати оптимальні варіанти різних типів засобів зв'язку з урахуванням сукупності техніко-економічних показників якості, що визначає необхідність використання методів багатокритеріальної оптимізації [1-5]. Багатокритеріальні задачі оптимізації в разі застосування безумовного критерію переваги призводять до підмножини Парето-оптимальних рішень на множині допустимих проектних варіантів [1,2]. Для звузнення підмножини Парето до єдиного переважного проектного варіанту необхідно застосувати умовний критерій переваги, заснований на використанні деякої додаткової інформації від експертів. Існують різні методи формування умовного критерію переваги з урахуванням інформації від експертів [3-5]. В результаті порівняльних досліджень цих методів отримано, що ефективним методом вибору єдиного переважного проектного варіанту є метод аналізу ієрархій (МАІ) [4,5]. В даному розділі розглянуті практичні особливості застосування МАІ для вибору переважних проектних варіантів на прикладі різних типів засобів зв'язку.

3.1 Деякі особливості методу аналізу ієрархій

Метод аналізу ієрархій полягає в декомпозиції проблеми вибору єдиного переважного варіанту системи на прості складові частини і отриманні суджень експертів по парним порівнянням різних елементів проблеми вибору. В результаті обробки отриманих чисельних даних суджень експертів формуються матриці парних порівнянь. Для цих матриць обчислюються головні власні вектори, відповідні максимальним власним значенням матриць парних порівнянь. Далі згідно з визначеними математичними процедурами отримують вектор глобальних пріоритетів, компоненти якого визначають пріоритетність вибору варіантів проектованої системи. Єдиному переважному варіанту системи із заданої множини допустимих варіантів відповідає максимальне значення компоненти вектора глобальних пріоритетів [4,5].

Принцип декомпозиції передбачає структурування проблеми вибору переважного варіанту системи у вигляді ієрархії рівнів з вершини (мета вибору) через проміжний рівень 2 (показники якості системи) до найнижчого рівня 3 (альтернативні варіанти побудови системи). Принцип порівняльних суджень експертів в МАІ полягає в тому, що об'єкти проблеми вибору порівнюються експертами попарно за важливістю. Попарно порівнюються важливості різних варіантів систем (на рівні 3) і різних показників якості (на рівні 2). Результати парних порівнянь елементів зводяться до матричної форми

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

де $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ – оцінки парних порівнянь елементів вибору.

Діагональ цієї матриці заповнюється значеннями «1», а елементи матриці, що лежать нижче діагоналі, заповнюються відповідними зворотними значеннями. Оцінки парних порівнянь елементів знаходяться з використанням суб'єктивних суджень експертів, чисельні значення яких визначаються за шкалою відносної важливості елементів, що представлена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Шкала відносної важливості елементів порівняння

Відносна важливість	Значення
1	Рівна важливість елементів порівняння
3	Невелика перевага одного елемента над іншим
5	Помірна перевага одного елемента над іншим
7	Значна перевага одного елемента над іншим
9	Дуже сильна перевага одного елемента над іншим
2,4,6,8	Проміжні рішення між двома судженнями

Далі виконується деяка обробка сформованих матриць парних порівнянь на рівнях 2 і 3, яка з математичної точки зору зводиться до обчислення головного власного вектора, відповідного максимальному власному значенню матриці парних порівнянь. Зокрема, компоненти головного власного вектора матриці парних порівнянь показників якості обчислюються як середнє геометричне значення в рядку матриці парних порівнянь [5,6]

$$V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.2)$$

де n – число показників якості.

Через компоненти головного власного вектора обчислюються відповідні компоненти вектора пріоритетів показників якості як нормовані значення

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.3)$$

$$S = \sum_{j=1}^n V_j, \quad (3.4)$$

Відповідно знаходяться оцінки матриць парних порівнянь варіантів систем на рівні 3 окремо по відношенню до кожного показника якості системи. На основі цих матриць обчислюються компоненти відповідних головних власних векторів і векторів пріоритетів систем $\vec{Q}_j$ по відношенню до окремими показниками якості систем.

З використанням отриманих даних обчислюються значення компонент вектора глобальних пріоритетів $\vec{c}$ згідно [6]

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_j Q_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3.5)$$

де N - число порівнюваних варіантів систем.

За максимальним значенням компонент вектора глобальних пріоритетів (3.5) вибирається відповідний переважний варіант системи.

В якості міри узгодженості суджень експертів розглядають два показники: індекс узгодженості (I_c) і відношення узгодженості (OC). Відомо, що узгодженість обернено симетричної матриці парних порівнянь у шкалі відносної важливості еквівалентна вимогам рівності її максимального власного значення λ_{max} і числа порівнюваних об'єктів ($\lambda_{max} \geq n$). В якості міри неузгодженості розглядають нормоване відхилення λ_{max} від n , відоме як індекс узгодженості [6]

$$I_c = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}. \quad (3.6)$$

Щоб оцінити, чи є отримане узгодження суджень експертів прийнятним чи ні, його порівнюють з випадковим індексом C_N . Випадковим індексом називають індекс узгодженості, розрахований для квадратної n -вимірної обернено симетричної матриці, елементи якої згенеровані випадковим чином за допомогою датчика випадкових чисел, розподілених по рівномірному закону для інтервалу значень від 1 до 15. У табл. 6.2 представлені середні узгодженості для випадкових матриць порядку від 1 до 15.

Таблиця 3.2. Величина випадкового індексу

Розмір матриці, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Випадковий індекс, C_N	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

Отримавши в результаті розрахунку згідно формули (3.6) індекс узгодженості і вибравши з табл. 2 випадковий індекс для заданого порядку матриці, розраховують відношення узгодженості [6]

$$OC = \frac{I_c}{C_N}. \quad (3.7)$$

Якщо отримана величина $OC \leq 0,15$, то ступінь узгодженості суджень експертів слід вважати прийнятною. В іншому випадку експертам рекомендується переглянути свої судження. Для цього необхідно виявити ті позиції в матриці суджень, які вносять максимальний внесок у величину відносини узгодженості, і спробувати змінити міру неузгодженості в меншу сторону.

3.2. Вибір переважного мовного кодека у мережах IP-телефонії з урахуванням сукупності показників якості.

Розглянемо особливості застосування методу аналізу ієрархій для вибору переважного варіанту мовного кодека з урахуванням сукупності показників якості. Використано дані деякої множини типових мовних кодектів,

використовуваних при проектуванні мереж IP-телефонії. 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. 3.3 наведено вихідні значення показників якості для деякої множини з 23 різних типів мовних кодеків [1-3].

Часова затримка збільшується зі збільшенням розміру кадру, а також зі збільшенням складності алгоритму кодування. При передачі мови припустима затримка в одному напрямку не може бути більше 250 мс.

Розмір кадру впливає на якість відтвореної мови: чим довше кадр, тим більш ефективно кодується мова. З іншого боку, зі збільшенням довжини кадру зростає затримка на обробку переданої інформації. Розмір кадру кодека визначається компромісом між цими вимогами.

Складність алгоритму кодування пов'язана з необхідністю обчислень в реальному часі. Складність алгоритму визначає швидкість обробки, вимірювану в мільйонах інструкцій за секунду (Millions of Instructions per second – MIPS). Складність обробки впливає на фізичні розміри кодувального, декодувального або комбінованого пристрою, а також на його вартість і споживану потужність.

Оцінювання якості кодування мови виконується за допомогою характеристики MOS (Mean Opinion Score). Це усереднена сукупна оцінка за 5-бальною шкалою.

Неважко бачити, що ці показники якості пов'язані між собою і мають конкуруючий характер – вони конфліктують між собою. Значення цих показників якості мовних кодеків наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Значення показників якості мовних кодеків

№	Кодеки	Швидкість кодування, кбіт/с	Оцінка якості кодування мови, MOS (1-5)	Складність реалізації, MIPS	Розмір кадру, мс	Сумарна затримка, мс
1	G 711	64	3,83	11,95	0,125	60
2	G 721	32	4,1	7,2	0,125	30
3	G 722	48	3,83	11,95	0,125	31,5
4	G 722(a)	56	4,5	11,95	0,125	31,5
5	G 722(b)	64	4,13	11,95	0,125	31,5
6	G 723.1(a)	5,3	3,6	16,5	30	37,5
7	G 723.1	6,4	3,9	16,9	30	37,5
8	G 726	24	3,7	9,6	0,125	30
9	G 726(a)	32	4,05	9,6	0,125	30
10	G 726(b)	40	3,9	9,6	0,125	30
11	G 727	24	3,7	9,9	0,125	30
12	G 727(a)	32	4,05	9,9	0,125	30

№	Кодеки	Швидкість кодування, кбіт/с	Оцінка якості кодування мови, MOS (1-5)	Складність реалізації, MIPS	Розмір кадрів, мс	Сумарна затримка, мс
13	G 727(b)	40	3,9	9,9	0,125	30
14	G 728	16	4	25,5	0,625	30
15	G 729	8	4,05	22,5	10	35
16	G 729a	8	3,95	10,7	10	35
17	G 729b	8	4,05	23,2	10	35
18	G 729ab	8	3,95	11,5	10	35
19	G 729e	8	4,1	30	10	35
20	G 729e(a)	11,8	4,12	30	10	35
21	G 727(c)	16	4	9,9	0,125	30
22	G 728(a)	12,8	4,1	16	0,625	30
23	G 729d	6,4	4	20	10	35

У табл. 3.5 наведені результати перетворення вихідних значень показників якості шляхом їхнього нормування й приведення до порівнянного виду. При цьому для всіх показників якості виконані операції нормування $K_{iH} = \frac{K_i}{K_{i\max}}$. Потім деякі показники якості перетворені в порівнянний вигляд, щоб вони носили однотипний характер залежно від технічних характеристик кодеків, зокрема, для показників K_{3i} і K_{5i} виконані перетворення $K'_i = \frac{1}{K_i}$.

Таблиця 3.5. Перетворені значення показників якості мовних кодеків

№	Тип кодека	K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}	K_{5i}
1	G 711	1	0,851	0,604	0,004	0,515
2	G 721	0,5	0,911	1	0,004	1
3	G 722	0,75	0,851	0,604	0,004	0,969
4	G 722(a)	0,875	1	0,604	0,004	0,969
5	G 722(b)	1	0,918	0,604	0,004	0,969
6	G 723.1(a)	0,083	0,8	0,439	1	0,818
7	G 723.1	0,1	0,867	0,424	1	0,818
8	G 726	0,375	0,822	0,748	0,004	1
9	G 726(a)	0,5	0,9	0,748	0,004	1
10	G 726(b)	0,625	0,866	0,748	0,004	1
11	G 727	0,375	0,822	0,727	0,004	1
12	G 727(a)	0,5	0,9	0,727	0,004	1

№	Тип кодека	K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}	K_{5i}
13	G 727(b)	0,625	0,866	0,727	0,004	1
14	G 728	0,25	0,889	0,281	0,021	1
15	G 729	0,125	0,9	0,317	0,333	0,879
16	G 729a	0,125	0,878	0,669	0,333	0,879
17	G 729b	0,125	0,9	0,309	0,333	0,879
18	G 729ab	0,125	0,878	0,626	0,333	0,879
19	G 729e	0,125	0,911	0,237	0,333	0,879
20	G 729e(a)	0,184	0,915	0,237	0,333	0,879
21	G 727(c)	0,25	0,889	0,727	0,004	1
22	G 728(a)	0,2	0,911	0,453	0,021	1
23	G 729d	0,1	0,889	0,359	0,333	0,879

Згідно методу аналізу ієрархій побудована матриця парних порівнянь для сукупності показників якості, тобто на другому рівні ієрархії (табл. 3.6). Для заповнення цієї таблиці за допомогою досвідченого експерта виконані парні порівняння важливості показників якості мовних кодеків. Діагональ цієї матриці заповнена значеннями «1», а елементи матриці, що лежать нижче діагоналі, заповнені зворотними значеннями.

Таблиця 3.6. Матриця парних порівнянь показників якості мовних кодеків і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	V_n	P_n
K_1	1	4	3	5	7	3,35	0,47
K_2	1/4	1	3	5	7	1,92	0,27
K_3	1/3	1/3	1	3	5	1,11	0,15
K_4	1/5	1/5	1/3	1	3	0,53	0,07
K_5	1/7	1/7	1/5	1/3	1	0,27	0,04

Також, у табл. 3.6 наведені матриця парних порівнянь і обчислені згідно (3.2) оцінки компонент власного вектора. За значеннями компонент власного вектора отримані згідно (3.3), (3.4) оцінки компонент вектора пріоритетів. Далі виконані парні порівняння на 3-му рівні ієрархії. Зокрема, виконані парні порівняння мовних кодеків окремо по відношенню до обраних показниками якості: швидкості кодування, якості кодування мови, складності реалізації, розміру кадру, сумарної затримки. В результаті обробки отриманих матриць парних порівнянь обчислені власні вектори і вектори пріоритетів.

У табл. 3.7 наведено отримані раніше компоненти вектора пріоритетів показників якості. З використанням цих векторів пріоритетів обчислені значення компонент глобального вектора пріоритетів згідно (3.5), які наведені в останньому стовпчику таблиці.

Таблиця 3.7. Результати обчислення значення компонент глобального вектора пріоритетів

№	Тип кодека	Компоненти векторів пріоритетів мовних кодеків по відношенню до показників якості					$\vec{c}$
		Q_{1j}	Q_{2j}	Q_{3j}	Q_{4j}	Q_{5j}	
1	G 711	0,006	0,008	0,026	0,005	0,003	0,0098
2	G 721	0,123	0,087	0,139	0,014	0,115	0,1083
3	G 722	0,012	0,009	0,024	0,006	0,035	0,0143
4	G 722(a)	0,007	0,128	0,028	0,007	0,0387	0,0443
5	G 722(b)	0,006	0,093	0,031	0,007	0,042	0,0353
6	G 723.1(a)	0,016	0,005	0,014	0,15	0,006	0,0227
7	G 723.1	0,018	0,016	0,013	0,16	0,006	0,0271
8	G 726	0,037	0,007	0,106	0,016	0,115	0,0411
9	G 726(a)	0,116	0,055	0,099	0,015	0,094	0,0893
10	G 726(b)	0,012	0,015	0,094	0,009	0,052	0,0271
11	G 727	0,106	0,006	0,075	0,012	0,083	0,0672
12	G 727(a)	0,096	0,056	0,075	0,013	0,073	0,0753
13	G 727(b)	0,012	0,016	0,064	0,009	0,067	0,0236
14	G 728	0,072	0,031	0,004	0,032	0,066	0,0481
15	G 729	0,027	0,054	0,007	0,084	0,021	0,0358
16	G 729a	0,026	0,020	0,053	0,074	0,01	0,0318
17	G 729b	0,024	0,048	0,006	0,077	0,011	0,0318
18	G 729ab	0,023	0,022	0,042	0,066	0,013	0,0288
19	G 729e	0,021	0,073	0,003	0,060	0,015	0,0354
20	G 729e(a)	0,041	0,079	0,004	0,055	0,019	0,0354
21	G 727(c)	0,072	0,038	0,060	0,011	0,042	0,056
22	G 728(a)	0,045	0,086	0,012	0,028	0,045	0,0503
23	G 729d	0,019	0,035	0,009	0,079	0,017	0,0264
	P_j	0,466	0,268	0,154	0,073	0,037	

За максимальним значенням компонент вектора глобальних пріоритетів (табл. 3.7) вибираємо переважний для мережі IP-телефонії мовний кодек з урахуванням введених показників якості та додаткової інформації від експертів. Таким є мовний кодек G.721, який характеризується наступними показниками якості: швидкість кодування – 32 кбіт / с, якість кодування мови – 4,1, складність реалізації – 7,2 MIPS, розмір кадру – 0,125 мс, сумарна затримка – 30 мс.

3.3. Вибір переважного варіанту системи масового обслуговування

Процеси обробки заявок у вузлах комутації мереж зв'язку описуються математичною моделлю у вигляді системи масового обслуговування (СМО).

Невід'ємною частиною СМО є прилад обслуговування, через який здійснюється взаємодія вхідного і вихідного потоку заявок. Вид математичної моделі СМО залежить як від числа каналів обслуговування n , так і від допустимої довжини черги m .

При цьому існують різні типи СМО, зазначені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8. Типи систем масового обслуговування заявок

№	Параметри СМО		Тип СМО
	n	m	
1	1	0	Одноканальна, без черги
2	$n > 1$	0	Багатоканальна, без черги
3	1	$1 < m < \infty$	Одноканальна, з обмеженою чергою
4	$n > 1$	$1 < m < \infty$	Багатоканальна, з обмеженою чергою
5	1	$m = \infty$	Одноканальна, з необмеженою чергою
6	$n > 1$	$m = \infty$	Багатоканальна, з необмеженою чергою

Показник навантаження системи обчислюється за формулою:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \overline{T_{об}}, \quad (3.8)$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку заявок, μ – інтенсивність потоку обслуговування, $\overline{T_{об}}$ – середній час обслуговування заявок.

Ймовірність простоювання СМО, тобто ймовірність того, що всі канали вільні, визначається згідно

$$p_0 = 1 - \rho. \quad (3.9)$$

Інтенсивність потоку обслуговування визначається згідно

$$\mu = \frac{1}{\overline{T_{об}}}. \quad (3.10)$$

Середній час очікування заявки в черзі визначається згідно

$$\overline{T_{оч}} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}. \quad (3.11)$$

У табл. 3.9 представлені вихідні і розраховані параметри згідно (3.8)-(3.11).

Таблиця 3.9. Вихідні дані для порівняльного аналізу і вибору СМО

Вихідні параметри	Варіанти СМО										
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}
$\overline{T}_{об}$	0,3	0,5	0,6	0,9	0,2	0,2	0,4	0,8	0,3	0,5	0,7
λ	0,5	0,8	0,4	0,6	0,7	0,5	0,7	0,6	0,8	0,4	0,9
Розраховані параметри											
ρ	0,15	0,4	0,24	0,54	0,14	0,1	0,28	0,48	0,24	0,2	0,63
p_0	0,85	0,6	0,76	0,46	0,86	0,9	0,72	0,52	0,76	0,8	0,37
μ	3,33	2	1,67	1,11	5	5	2,5	1,25	3,33	2	1,43
$\overline{T}_{оч}$	0,05	1,11	0,19	1,06	0,03	0,02	0,16	0,74	0,09	0,13	1,19

Для знаходження переважного варіанту СМО використано метод аналізу ієрархій. Були обрані наступні показники якості:

$K_1 = \overline{T}_{об}$ – середній час обслуговування заявок;

$K_2 = \rho$ – показник навантаження системи (трафік);

$K_3 = p_0$ – ймовірність простоювання системи, тобто ймовірність того, що всі канали вільні;

$K_4 = \overline{T}_{оч}$ – середній час очікування заявки в черзі.

Таблиця 3.10. Значення показників якості СМО

Показники якості	Варіанти систем										
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}
$\overline{T}_{об}$	0,3	0,5	0,6	0,9	0,2	0,2	0,4	0,8	0,3	0,5	0,7
ρ	0,15	0,4	0,24	0,54	0,14	0,1	0,28	0,48	0,24	0,2	0,63
p_0	0,85	0,6	0,76	0,46	0,86	0,9	0,72	0,52	0,76	0,8	0,37
$\overline{T}_{оч}$	0,05	1,11	0,19	1,06	0,03	0,02	0,16	0,74	0,09	0,13	1,19

Параметри СМО нормовані до максимальних значень і приведені до порівняльного вигляду. У табл. 3.11 наведені нормовані значення показників якості СМО [6].

У табл. 3.12 наведені матриця парних порівнянь показників якості та обчислені згідно (3.2) оцінки компонент головного власного вектора. За значеннями компонент власного вектора отримані згідно (3.3) оцінки компонент вектора пріоритетів.

Таблиця 3.11. Нормовані значення показників якості СМО

Показ- ники якості	Варіанти систем										
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}
K'_1	0,67	0,4	0,33	0,22	1	1	0,5	0,25	0,67	0,4	0,29
Показ- ники якості	Варіанти систем										
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}
K'_2	0,67	0,25	0,42	0,19	0,71	1	0,36	0,21	0,42	0,5	0,16
K'_3	0,44	0,62	0,49	0,8	0,43	0,41	0,51	0,71	0,49	0,46	1
K'_4	0,4	0,02	0,11	0,02	0,67	1	0,13	0,03	0,22	0,15	0,02

Таблиця 3.12. Матриця парних порівнянь показників якості та обчислені компоненти вектора пріоритетів

	K_1	K_2	K_3	K_4	V_j	P_j
K_1	1	3	5	5	2,94	0,55
K_2	1/3	1	3	3	1,32	0,25
K_3	1/5	1/3	1	4	0,72	0,13
K_4	1/5	1/3	1/4	1	0,36	0,07

У табл. 3.13 наведена матриця парних порівнянь СМО по відношенню до середнього часу обслуговування заявок, а також компоненти відповідного головного власного вектора і вектора пріоритетів.

У табл. 3.14 наведена матриця парних порівнянь СМО по відношенню до показника навантаження системи, а також компоненти відповідного головного власного вектора і вектора пріоритетів.

У табл. 3.15 наведена матриця парних порівнянь СМО по відношенню до ймовірності простоювання всієї системи, а також компоненти відповідного головного власного вектора і вектора пріоритетів.

Таблиця 3.13. Матриця парних порівнянь СМО по відношенню до середнього часу обслуговування заявок і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	V_{1j}	Q_{1j}
N_1	1	3	5	9	1/3	1/3	4	7	2	3	5	2,36	0,147
N_2	1/3	1	3	7	1/5	1/5	1/3	5	1/3	4	5	1,11	0,069
N_3	1/5	1/3	1	5	1/5	1/5	1/3	5	1/5	1/3	3	0,61	0,038
N_4	1/9	1/7	1/5	1	1/9	1/9	1/7	1/3	1/9	1/7	1/3	0,19	0,012
N_5	3	5	5	9	1	2	3	7	3	5	7	3,88	0,241
N_6	3	5	5	9	1/2	1	3	7	3	5	7	3,42	0,213
N_7	1/4	3	3	7	1/3	1/3	1	7	1/4	3	5	1,42	0,088
N_8	1/7	1/5	1/5	3	1/7	1/7	1/7	1	1/7	1/5	1/3	0,27	0,017

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	V_{1j}	Q_{1j}
N_9	1/2	3	5	9	1/3	1/3	4	7	1	1/3	1/5	1,27	0,079
N_{10}	1/3	1/4	3	7	1/5	1/5	1/3	5	3	1	5	1,05	0,065
N_{11}	1/5	1/5	1/3	3	1/7	1/7	1/5	3	5	1/5	1	0,5	0,031

Таблиця 3.14. Матриця парних порівнянь СМО по відношенню до показника навантаження системи і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	V_{2j}	Q_{2j}
N_1	1	5	3	7	1/2	1/4	3	5	3	3	7	2,356	0,146
N_2	1/5	1	1/5	3	1/7	1/5	1/3	6	1/5	1/3	5	0,575	0,036
N_3	1/3			7	1/3	1/3	8	5	2	1/4	7	1,605	0,1
N_4	1/7	1/3	1/7	1	1/7	1/7	1/5	1/4	1/7	1/5	3	0,272	0,017
N_5	2	7	3	7	1	1/2	5	5	3	3	7	3,074	0,191
N_6	4	5	3	7	2	1	3	5	3	3	9	3,518	0,218
N_7	1/3	3	1/8	5	1/5	1/3	1	5	1/8	1/6	7	0,728	0,045
N_8	1/5	1/6	1/5	4	1/5	1/5	1/5	1	1/5	1/3	3	0,401	0,025
N_9	1/3	5	1/2	7	1/3	1/3	8	5	1	1/4	7	1,415	0,088
N_{10}	1/3	3	4	5	1/3	1/3	6	3	4	1	7	1,893	0,118
N_{11}	1/7	1/5	1/7	1/3	1/7	1/9	1/7	1/3	5	1/7	1	0,277	0,017

Таблиця 3.15. Матриця парних порівнянь СМО по відношенню до ймовірності простоювання всієї системи і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	V_{3j}	Q_{3j}
N_1	1	1/5	1/3	1/9	2	3	1/3	1/7	1/3	1/4	1/9	0,373	0,02
N_2	5	1	3	1/5	5	5	3	1/3	3	5	1/5	1,636	0,089
N_3	3	1/3	1	1/7	3	5	1/4	1/5	2	4	1/7	0,826	0,045
N_4	9	5	7	1	9	9	7	3	7	7	1/3	4,277	0,232
N_5	1/2	1/5	1/3	1/9	1	6	1/3	1/7	1/3	1/4	1/9	0,35	0,019
N_6	1/3	1/5	1/5	1/9	1/6	1	1/5	1/7	1/5	1/3	1/9	0,218	0,012
N_7	3	1/3	4	1/7	3	5	1	1/5	4	6	1/7	1,175	0,064
N_8	7	3	5	1/3	7	7	5	1	5	7	1/5	2,719	0,147
N_9	3	1/3	1/2	1/7	3	5	1/4	1/5	1	7	1/7	0,766	0,042
N_{10}	4	1/5	1/4	1/7	4	3	1/6	5	1/7	1	1/7	0,626	0,034
N_{11}	9	5	7	3	9	9	7	5	7	7	1	5,47	0,297

У табл. 3.16 наведена матриця парних порівнянь СМО по відношенню до середнього часу очікування заявки в черзі, а також компоненти відповідного їй головного власного вектора і вектора пріоритетів. Результати обчислення компонент вектора глобальних пріоритетів згідно (3.5) наведені в табл. 3.16.

Таблиця 3.16. Матриця парних порівнянь по відношенню до середнього часу очікування заявки в черзі і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	N_{10}	N_{11}	V_{4j}	Q_{4j}
N_1	1	9	5	7	1/4	1/4	5	7	4	3	9	2,77	0,161
N_2	1/9	1	1/7	1/4	1/9	1/9	1/5	1/5	1/7	1/5	2	0,23	0,014
N_3	1/5	7	1	5	1/5	1/5	1/2	3	1/3	1/6	7	0,85	0,049
N_4	1/7	4	1/5	1	1/7	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	6	0,38	0,022
N_5	4	9	5	7	1	1/2	3	5	6	3	9	3,65	0,211
N_6	4	9	5	7	2	1	5	5	3	5	9	4,27	0,247
N_7	1/5	5	2	5	1/3	1/5	1	3	1/3	1/4	5	0,98	0,057
N_8	1/7	5	1/3	3	1/5	1/5	1/3	1	1/5	1/3	5	0,59	0,034
N_9	1/4	7	3	7	1/6	1/3	3	5	1	3	7	1,8	0,104
N_{10}	1/3	5	6	5	1/3	1/5	4	5	1/3	1	5	1,53	0,089
N_{11}	1/9	1/2	1/7	1/6	1/9	1/9	1/5	1/5	1/7	1/5	1	0,2	0,011

Таблиця 3.17. Результати обчислення компонент вектора глобальних пріоритетів в СМО

	Q_{1j}	Q_{2j}	Q_{3j}	Q_{4j}	C_i
N_1	0,147	0,146	0,02	0,161	0,131
N_2	0,069	0,036	0,089	0,014	0,059
N_3	0,038	0,01	0,045	0,049	0,032
N_4	0,012	0,017	0,232	0,022	0,042
N_5	0,241	0,191	0,019	0,211	0,197
N_6	0,213	0,218	0,012	0,247	0,191
N_7	0,088	0,045	0,064	0,057	0,071
N_8	0,017	0,025	0,147	0,034	0,037
N_9	0,079	0,088	0,042	0,104	0,078
N_{10}	0,065	0,118	0,034	0,089	0,075
N_{11}	0,031	0,017	0,297	0,011	0,061
P_j	0,55	0,25	0,13	0,07	

За максимальним значенням компонент вектора глобальних пріоритетів $\vec{c}$ (табл. 3.17) вибрано переважний варіант СМО з урахуванням сукупності показників якості. Таким варіантом є СМО N_5 , який характеризується середнім часом обслуговування заявок $\overline{T_{об}} = 0,2$ час, показником навантаження системи $\rho = 0,14$, ймовірністю простоювання всієї системи $p_0 = 0,86$, середнім часом очікування заявки в черзі $\overline{T_{оч}} = 0,03$ час.

3.4 Вибір переважного варіанту системи мобільного зв'язку 3-го покоління

Метод аналізу ієрархій застосовано для вибору єдиного переважного варіанту з підмножини Парето-оптимальних проектних рішень, які були отримані при плануванні систем мобільного зв'язку (СМЗ) 3-го покоління в п.

2.2. При цьому були використані дані з табл. 2.3 для п'яти Парето-оптимальних проектних варіантів СМЗ: №1, №5, №8, №9, №10. Ці параметри СМЗ були нормовані до максимальних значень і приведені до порівнянного виду. У табл. 3.18 представлені перетворені значення показників якості ММЗ [6].

Таблиця 3.18. Нормовані показники якості до максимальних значень

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	V_{1j}	Q_{1j}
N_1	1	1/3	1/7	1/9	1/9	0,23	0,03
N_2	3	1	1/7	1/9	1/9	0,35	0,04
N_3	7	7	1	1/7	1/7	1	0,11
N_4	9	9	7	1	2	4,08	0,47
N_5	9	9	7	1/2	1	3,09	0,35

Побудована матриця парних порівнянь сукупності показників якості СМЗ, для якої обчислено головний власний вектор і вектор пріоритетів (табл. 3.19).

Таблиця 3.19. Матриця парних порівнянь показників якості та обчислені компоненти вектора пріоритетів

	K_1	K_2	K_3	V_j	P_j
K_1	1	5	3	2,464	0,6173
K_2	1/5	1	1/5	0,3424	0,0858
K_3	1/3	5	1	1,1854	0,297

Далі виконані парні порівняння варіантів СМЗ на 3-му рівні ієрархії. Зокрема, виконані парні порівняння СМЗ по відношенню до обраних показників якості. У табл. 3.20, 3.21, 3.22 наведені матриці парних порівнянь варіантів побудови СМЗ по відношенню до кожного показника якості – ймовірності блокування, кількості базових станцій, а також компоненти відповідних головних власних векторів і векторів пріоритетів.

Таблиця 3.20. Матриця парних порівнянь варіантів СМЗ по відношенню до ймовірності блокування

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	V_{1j}	Q_{1j}
N_1	1	1/3	1/7	1/9	1/9	0,23	0,03
N_2	3	1	1/7	1/9	1/9	0,35	0,04
N_3	7	7	1	1/7	1/7	1	0,11
N_4	9	9	7	1	2	4,08	0,47
N_5	9	9	7	1/2	1	3,09	0,35

Таблиця 3.21. Матриця парних порівнянь варіантів СМЗ по відношенню до щільності абонентів, що обслуговуються і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	V_{2j}	Q_{2j}
N_1	1	1/5	3	1/3	1/5	0,53	0,07
N_2	5	1	7	3	3	3,16	0,45
N_3	1/3	1/7	1	1/5	1/7	0,27	0,04
N_4	3	1/3	5	1	1/3	1,11	0,16
N_5	5	1/3	7	3	1	2,04	0,29

Таблиця 3.22. Матриця парних порівнянь варіантів СМЗ по відношенню до кількості базових станцій і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	V_{3j}	Q_{3j}
N_1	1	7	3	5	7	3,74	0,51
N_2	1/7	1	1/5	1/3	3	0,49	0,07
N_3	1/3	5	1	3	5	1,9	0,26
N_4	1/5	3	1/3	1	3	0,9	0,12
N_5	1/7	1/3	1/5	1/3	1	0,32	0,04

У табл. 3.23 зведено компоненти векторів пріоритетів показників якості і варіантів побудови СМЗ по відношенню до кожного показника якості, а також обчислені згідно (3.5) компоненти вектора глобальних пріоритетів $\vec{C}$.

Таблиця 3.24. Результати обчислення компонент глобального вектора пріоритетів СМЗ 3-го покоління

СМЗ	Q_{1j}	Q_{2j}	Q_{3j}	$\bar{N}_i$
N_1	0,03	0,07	0,51	0,1779
N_2	0,04	0,45	0,07	0,0863
N_3	0,11	0,04	0,26	0,1498
N_4	0,47	0,16	0,12	0,3418
N_5	0,35	0,29	0,04	0,2551
P_j	0,62	0,09	0,3	

Максимальному значенню компонент вектора глобальних пріоритетів $\vec{C}$ відповідає переважний варіант СМЗ (N_4), який характеризується мінімальною припустимою можливістю блокування $P_{\text{бл}} = 0,02$, щільністю абонентів, що обслуговуються $N_a/S_0 = 183 \text{ аб./км}^2$, і кількістю базових станцій $N_{\text{БТС}} = 18$.

3.5. Вибір переважної технології мобільного зв'язку 4-го покоління

Для порівняльного аналізу було обрано такі технології мобільного зв'язку 4-го покоління: HSPA, WiMAX і LTE. Коротко розглянемо їх особливості.

В результаті розвитку технологій мобільного зв'язку була створена технологія HSPA + (HSPA реліз 7 і окремі поправки релізу 8). У низхідному каналі її відрізняє модуляція 64-QAM с SIMO (1x2) або 64-QAM с SIMO (2x2). У висхідному каналі додана модуляція 64-QAM і поліпшені можливості для VoIP. Поправки відповідно до релізу 8 дозволяють використовувати в низхідному каналі режим MIMO (2x2) з модуляцією 64-QAM, розглядається можливість використання MIMO високих порядків в низхідному каналі і MIMO (2x2) – у висхідному каналі.

Мережі мобільного зв'язку з технологією WiMAX призначені для надання сервісів як нерухомим, так і рухомих користувачам. Мобільний WiMAX (реліз 1.5) має порівнянні з HSPA + (реліз 8) пікові швидкості в низхідному каналі при однаковій модуляції, швидкості кодування і ширині каналу. При цьому у мобільного WiMAX у висхідному каналі пікова швидкість вище в 2-3 рази. Мобільний WiMAX підтримує ширину каналу до 20 МГц, а також як частотне, так і часове дуплексування. Його частотні профілі плануються в діапазонах 700, 1700, 2300, 2500 і 3500 МГц. Мобільний WiMAX забезпечує «гладку IP-мережу» (від краю до краю).

Наступним кроком еволюції систем 3GPP, є системи Long Term Evolution (LTE). Їх відрізняє технологія OFDMA у низхідному каналі і SC-FDMA – у висхідному, а також модуляція – 64-QAM, ширина каналу – до 20 МГц, дуплексування TDD і FDD. Застосовані адаптивні антенні системи, гнучка мережа доступу. Її мережева архітектура це повністю IP-мережа. В системі LTE застосовуються технології і методи, що вже застосовуються в мобільному WiMAX, тому схожі показники їх ефективності. Системи LTE – це революційне поліпшення систем 3G. LTE являє перехід від систем з CDMA до систем з OFDMA, а також перехід до повністю IP-системи з комунікацією пакетів. Тому впровадження цієї технології на існуючих мережах мобільного зв'язку означає необхідність нових радіочастотних ресурсів для отримання переваги від широкосмугового каналу. Для забезпечення зворотної сумісності необхідні дворежимні абонентські пристрої [6].

Показники якості розглянутих технологій ММЗ носять конкуруючий характер. Тому необхідно застосовувати методи багатокритеріальної оптимізації для вибору переважного варіанту технологій ММЗ. Розглянемо особливості вибору переважної технології мобільного зв'язку 4-го покоління з використанням методу аналізу ієрархій.

У табл. 3.25 наведені матриця парних порівнянь показників якості, а також обчислені оцінки компонент головного власного вектора і вектора пріоритетів показників якості.

Таблиця 3.25. Матриця парних порівнянь показників якості та обчислені компоненти вектора пріоритетів

	K_1	K_2	K_3	V_j	P_j
K_1	1	3	1/3	1	0,2584
K_2	1/3	1	1/5	0,4058	0,1049
K_3	3	5	1	2,464	0,6367

Далі виконані парні порівняння варіантів технологій на 3-му рівні ієрархії. Зокрема, виконані парні порівняння технологій по відношенню до обраними показниками якості. В результаті обробки отриманих матриць парних порівнянь обчислені відповідні головні власні вектори і вектори пріоритетів.

У табл. 3.26, 3.27, 3.28 наведені матриці парних порівнянь стандартів мережі мобільного зв'язку по відношенню до показників якості – спектральної ефективності, до радіусу дії, швидкості передачі даних. Тут же наведені обчислені компоненти відповідних головних власних векторів і векторів пріоритетів.

Таблиця 3.26. Матриця парних порівнянь варіантів технологій ММЗ по відношенню до спектральної ефективності та обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_{1j}	Q_{1j}
N_1	1	1/5	1/5	1/5	0,299	0,057
N_2	5	1	3	3	2,59	0,4935
N_3	5	1/3	1	3	1,495	0,2849
N_4	5	1/3	1/3	1	0,863	0,1645

Таблиця 3.27. Матриця парних порівнянь технологій ММЗ по відношенню до радіусу дії і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_{2j}	Q_{2j}
N_1	1	1/3	1/5	5	0,76	0,1301
N_2	3	1	1/3	7	1,627	0,2785
N_3	5	3	1	7	3,201	0,5481
N_4	1/5	1/7	1/7	1	0,253	0,0433

Таблиця 3.28. Матриця парних порівнянь технологій ММЗ по відношенню до швидкості передачі даних і обчислені компоненти вектора пріоритетів

	N_1	N_2	N_3	N_4	V_{3j}	Q_{3j}
N_1	1	1/3	1/5	1/7	0,31	0,0433
N_2	3	1	1/3	1/5	0,67	0,0928
N_3	5	3	1	3	2,59	0,3593
N_4	7	5	5	1	3,64	0,5046

У табл. 3.29 наведені результати обчислення вектора глобальних пріоритетів. Видно, що переважним варіантом технології ММЗ, що відповідає максимальному значенню компонент вектора глобальних пріоритетів, є варіант N_4 . Це технологія LTE зі швидкістю передачі даних – 75 Мбіт/с, спектральною ефективністю – 1,57 біт/Гц / с і радіусом дії базових станцій – 5 км.

Таблиця 3.29. Результати обчислення компонент вектора глобальних пріоритетів технологій ММЗ 4-го покоління

СМЗ	Q_{1j}	Q_{2j}	Q_{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	

3.6 Вибір переважного типу мобільного телефону

Вважається, що задано деяка множина різних типів мобільних телефонів, які характеризуються сукупністю техніко-економічних показників якості. Згідно з методологією розв'язання багатокритеріальних задач спочатку будемо знаходити підмножину Парето-оптимальних типів мобільних телефонів у критеріальному просторі показників якості. Потім у підмножині Парето виділимо єдиний переважний варіант із залученням методу аналізу ієрархій.

При цьому використовувалися дані про 19 типів мобільних телефонів, які оцінювалися сукупністю показників якості, що характеризують їх споживчі властивості: k_1 – характеристики процесора, k_2 – характеристики екрану, k_3 – характеристики камери, k_4 – характеристики оперативної пам'яті, k_5 – ціну. У табл. 3.30 наведені результати нормованих вихідних значень показників якості мобільних телефонів [4-6].

Таблиця 3.30. Нормовані значення показників якості мобільних телефонів

№	Тип телефону	$k_{1н}$	$k_{2н}$	$k_{3н}$	$k_{4н}$	$k_{5н}$	Парето-оптимальні варіанти
1	Samsung Galaxy S5	0,63	0,85	1	0,66	0,21	+
2	Samsung Galaxy S4	0,59	0,83	0,81	0,66	0,37	–
3	Samsung Galaxy S3	0,51	0,8	0,5	0,5	0,54	–
4	Samsung Galaxy Note Edge	1	0,93	1	1	0,14	+
5	Samsung Galaxy A7	0,48	0,91	0,81	0,66	0,27	–
6	Samsung Galaxy Ace 4	0,37	0,66	0,31	0,17	1	+
7	HTC Desire Eye	0,85	0,86	0,81	0,66	0,2	+
8	HTC One E8	0,92	0,83	0,81	0,66	0,19	+
9	HTC Desire 700	0,44	0,83	0,5	0,33	0,35	–
10	HTC Desire 510	0,44	0,78	0,31	0,33	0,51	–
11	HTC Desire 610	0,44	0,78	0,5	0,33	0,43	–
12	Asus ZenFone 6	0,74	1	0,81	0,66	0,38	+
13	Asus ZenFone 5	0,44	0,83	0,5	0,66	0,41	–
14	Lenovo Vibe Z2	0,92	1	1	1	0,18	+
15	Lenovo S90	0,44	0,83	0,81	0,66	0,38	–

№	Тип телефону	k_{1H}	k_{2H}	k_{3H}	k_{4H}	k_{5H}	Парето-оптимальні варіанти
16	Lenovo S580	0,44	0,83	0,5	0,33	0,81	+
17	Lenovo S856	0,44	0,93	0,5	0,33	0,43	–
18	Lenovo A7000	0,55	0,93	0,5	0,66	0,59	+
19	Sony Xperia L C2105	0,37	0,71	0,5	0,33	0,62	–

На основі отриманих даних в критеріальную просторі оцінок показників якості з початкової множини 19 типів мобільних телефонів виділено підмножину Парето-оптимальних варіантів, що включає 9 варіантів мобільних телефонів (в табл. 3.30 вони відмічені знаком +).

Далі розглянуто вибір типу мобільного телефону з підмножини Парето-оптимальних варіантів з використанням методу аналізу ієрархій. Для підмножини Парето-оптимальних варіантів телефонів побудована матриця парних порівнянь сукупності показників якості (табл. 3.31). Для заповнення цієї таблиці за допомогою експерта виконано парні порівняння важливості показників якості мобільних телефонів. Результати обчислення значень компонент вектора пріоритетів показників якості наведені в табл. 3.31.

Таблиця 3.31. Матриця парних порівнянь показників якості мобільних телефонів і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

Показники якості	Процесор	Екран	Камера	ОП	Ціна	V_j	P_j
Процесор	1	5	9	3	7	3,936	0,509
Екран	1/5	1	3	1/3	5	1,043	0,135
Камера	1/9	1/3	1	1/7	1/3	0,278	0,036
ОП	1/3	3	7	1	5	2,032	0,263
Ціна	1/7	1/5	3	1/5	1	0,441	0,057

Далі виконані парні порівняння типів мобільних телефонів по Далі виконані парні порівняння типів мобільних телефонів по відношенню до обраних показників якості. В результаті обробки отриманих матриць парних порівнянь обчислені власні вектори і вектори пріоритетів. Для прикладу в табл. 3.32 приведена матриця парних порівнянь мобільних телефонів по відношенню до ОП, а також обчислені компоненти головного власного вектора $\vec{V}_4$ і відповідного вектора пріоритетів $\vec{Q}_4$.

Таблиця 3.32. Матриця парних порівнянь типів мобільних телефонів по відношенню до ОП і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

№	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9	V_{4j}	Q_{4j}
N_1	1	1/4	7	2	2	2	1/4	5	2	1,484	0,114
N_2	4	1	9	4	4	4	2	7	4	3,697	0,285
N_3	1/7	1/9	1	1/7	1/7	1/7	1/9	1/3	1/7	0,183	0,014
N_4	1/2	1/4	7	1	2	2	1/4	5	2	1,273	0,098

N_5	1/2	1/4	7	1/2	1	2	1/4	5	2	1,091	0,084
N_6	1/2	1/4	7	1/2	1/2	1	1/4	5	2	0,935	0,073
N_7	4	1/2	9	4	4	4	1	7	4	3,169	0,246
N_8	1/5	1/7	3	1/5	1/5	1/5	1/7	1	1/5	0,299	0,024
N_9	1/2	1/4	7	1/2	1/2	1/2	1/4	5	1	0,801	0,062

Відповідно обчислені компоненти векторів пріоритетів Q_{ij} по відношенню до характеристик процесора, екрана, камери і ціни. Компоненти цих векторів наведені у вигляді відповідних стовпців в табл. 3.33. У цій таблиці в нижньому рядку також наведені отримані раніше компоненти вектора пріоритетів показників якості P_i . З використанням цих даних обчислені значення компонент вектора глобальних пріоритетів згідно співвідношенню (3.5), які наведені в останньому стовпчику табл. 3.32.

Таблиця 3.33. Результати обчислення значення компонент глобального вектора пріоритетів

№	Типи телефонів	Q_{ij}					C_i
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	
1	Samsung Galaxy S5	0,054	0,06	0,25	0,114	0,056	0,077
2	Samsung Galaxy Note Edge	0,287	0,167	0,214	0,285	0,018	0,252
3	Samsung Galaxy Ace 4	0,021	0,013	0,014	0,014	0,365	0,037
4	HTC Desire Eye	0,033	0,081	0,11	0,098	0,042	0,059
5	HTC One E8	0,228	0,039	0,094	0,084	0,034	0,148
6	Asus ZenFone 6	0,116	0,264	0,081	0,073	0,082	0,121
7	Lenovo Vibe Z2	0,191	0,226	0,184	0,246	0,029	0,201
8	Lenovo S580	0,022	0,032	0,028	0,024	0,269	0,038
9	Sony Xperia L C2105	0,047	0,117	0,024	0,062	0,105	0,063
P_i		0,509	0,135	0,036	0,263	0,057	

За максимальним значенням компонент вектора глобальних пріоритетів обраний переважний тип мобільного телефону. Таким є мобільний телефон типу Samsung Galaxy NoteEdge, який характеризується наступними характеристиками: процесора – 2.7 ГГц, екрану – 5.6", камери – 16 Мп, ОП – 3 Гб і ціна – 19000 грн.

3.7. Вибір переважного варіанту протоколу маршрутизації в ad-hoc мережах

Розглянемо особливості застосування методу аналізу ієрархій для вибору єдиного переважного варіанту протоколу маршрутизації в ad-hoc мережах з урахуванням сукупності показників якості. Як показники якості обрані основні характеристики протоколів, зокрема, k_1 – час конвергенції, k_2 – пам'ять, k_3 – управління. У табл. 3.34 наведено вихідні дані для показників якості при різних протоколах маршрутизації.

Таблиця 3.34. Вихідні дані для показників якості протоколів маршрутизації

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

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

Згідно методу аналізу ієрархій побудована матриця парних порівнянь показників якості (табл. 3.35). Для заповнення цієї таблиці за допомогою експертів виконані парні порівняння важливості показників якості протоколів маршрутизації.

Таблиця 3.35. Матриця парних порівнянь 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

Далі виконані 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, які наведені в табл. 3.36-3.38.

Таблиця 3.36. Матриця парних порівнянь протоколів маршрутизації по відношенню до часу конвергенції і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	V_{1j}	Q_{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 3.37. Матриця парних порівнянь протоколів маршрутизації по відношенню до пам'яті і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	V_{2j}	Q_{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 3.38. Матриця парних порівнянь протоколів маршрутизації по відношенню до управління і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	DSDV	OLSR	WRP	AODV	DSR	V_{3j}	Q_{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

У табл. 3.39 наведені отримані оцінки компонент вектора пріоритетів показників якості, а також векторів пріоритетів протоколів маршрутизації, по відношенню до часу конвергенції, пам'яті, управління. З використанням цих даних обчислені значення компонент глобального вектора пріоритетів згідно (3.5), які наведені в останньому стовпчику табл. 3.39 [6].

Таблиця 3.39. Результати обчислення значень компонент глобального вектора пріоритетів

№	Протоколи	Q_{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	

Максимального значення 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.

3.8. Вибір переважного варіанту модуляції в цифрових системах зв'язку

Для порівняльного аналізу були обрані дані для систем цифрового зв'язку з різними видами багатопозиційною модуляції, зокрема, когерентної MPSK і некогерентного MFSK при різній кількості позицій (кратності модуляції) M і заданій ймовірності бітової помилки. Як показники якості були обрані ефективність Для порівняльного аналізу були обрані дані для систем цифрового зв'язку з різними видами багатопозиційною модуляції, зокрема, когерентної MPSK і некогерентного MFSK при різній кількості позицій (кратності модуляції) M і заданій ймовірності бітової помилки. Як показники якості були обрані ефективність використання смуги пропускання R/W і відношення сигнал/шум E_b/N_0 . На рис. 3.1 показана гранична залежність цих показників, а також наведені робочі точки для когерентної MPSK і некогерентної MFSK при різних значеннях M для ймовірності бітової помилки $P_b = 10^{-5}$. Передбачається, що до модуляції здійснюється фільтрація по Найквіста (ідеальна прямокутна), так що мінімальна подвійна смуга пропускання на проміжній частоті (intermediate frequency – IF) $W_{IF} = 1/T$, де T – тривалість бітового символу. При цьому ефективність використання смуги частот $R/W = \log_2 M$ [6].

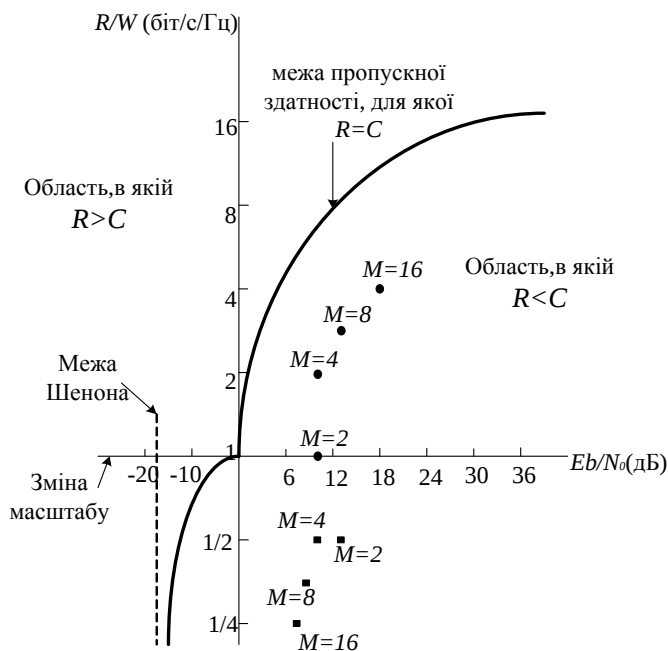


Рис. 3.1. Значення показників якості для різних видів модуляції (● – когерентна MPSK, ■ – некогерентна MFSK)

Видно, що при модуляції MPSK значення R/W росте зі збільшенням M . На рис. 3.1 також зображені робочі точки для некогерентного ортогональної модуляції MFSK. Ефективність використання смуги частот визначається виразом $R/W = (\log_2 M)/M$. При модуляції MFSK показник R/W знижується зі збільшенням M . Положення робочих точок MFSK вказує, що модуляції BFSK ($M = 2$) і квадратична FSK ($M = 4$) мають однакову ефективність використання смуги частот, хоча перша вимагає більшого значення E_b/N_0 для тієї ж ймовірності бітової помилки. Видно, що обрані показники якості систем носять конкуруючий характер. Тому для вибору переважного варіанту виду і параметрів модуляції в системах цифрового зв'язку слід використовувати методи багатокритеріального вибору. Будемо розглядати вибір переважного варіанту модуляції, що заснований на методі аналізу ієрархій.

Таблиця 3.40. Значення показників якості систем цифрового зв'язку з різним видом і параметрами модуляції

Показники якості систем	Варіанти систем зв'язку							
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8
	MPSK				MFSK			
	M=2	M=4	M=8	M=16	M=2	M=4	M=8	M=16
$K_1 = E_b/N_0$, бим/с/Гц	10	10	13	18	13	10	8	7
$K_2 = R/W$, дБ	1	2	3	4	1/2	1/2	1/3	1/4

Вихідні значення показників якості K_1 та K_2 нормовані до максимальних значень (табл. 3.41).

Таблиця 3.41. Нормовані значення показників якості для різних варіантів систем цифрового зв'язку

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8
K_1	0,699	0,699	0,538	0,392	0,538	0,699	0,874	1
K_2	0,25	0,5	0,75	1	0,125	0,125	0,083	0,063

З урахуванням суджень експертів сформовані матриці парних порівнянь зазначених показників якості, а також різних варіантів систем по відношенню до кожного показника якості. За цими матрицями обчислені компоненти головних власних векторів і векторів пріоритетів згідно (3.2 – 3.5) з використанням програмного комплексу, створеного в середовищі EXEL. У табл. 3.42 наведені обчислені оцінки компоненти головного власного вектора і вектора пріоритетів показників якості.

Таблиця 3.42. Матриця парних порівнянь показників якості, компоненти головного власного вектора і вектора пріоритетів

	K_1	K_2	V_n	P_n
K_1	1	1/2	0,707	0,333
K_2	2	1	1,414	0,667

У табл. 3.43 наведена матриця парних порівнянь варіантів систем зв'язку з модуляціями MPSK і MFSK по відношенню до сигнал/шум E_b/N_0 , а також компоненти відповідного їй власного вектора і вектора пріоритетів. У цій таблиці наведені також отримані компоненти вектора пріоритетів показника якості $\vec{P}_1$

Таблиця 3.43. Матриця парних порівнянь варіантів модуляції по відношенню до показника якості K_1

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	V_1	P_1
N_1	1	2	3	5	3	2	1/3	1/5	1,3643	0,117
N_2	1/2	1	3	5	3	2	1/3	1/5	1,1472	0,098
N_3	1/3	1/3	1	3	2	1/3	1/5	1/7	0,5313	0,045
N_4	1/5	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	0,2476	0,021
N_5	1/3	1/3	1/2	3	1	1/3	1/5	1/7	0,4468	0,038
N_6	1/2	1/2	3	5	3	1	1/3	1/5	0,9647	0,082
N_7	3	3	5	7	5	3	1	1/3	2,5099	0,214
N_8	5	5	7	9	7	5	3	1	4,4906	0,384

У табл. 3.44 наведена матриця парних порівнянь варіантів модуляції MPSK і MFSK по відношенню до ефективності використання смуги пропускання R/W , а також відповідні їй власний вектор і вектор пріоритетів $\vec{P}_2$.

Таблиця 3.44. Матриця парних порівнянь варіантів модуляції по відношенню до показника якості K_2

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	V_2	P_2
N_1	1	1/5	1/5	1/7	3	3	5	7	1,076	0,078
N_2	5	1	1/3	1/5	7	7	9	9	2,456	0,179
N_3	5	3	1	1/3	7	7	9	9	3,445	0,25
N_4	7	5	3	1	7	7	9	9	5,041	0,366
N_5	1/3	1/7	1/7	1/7	1	2	5	5	0,685	0,05
N_6	1/3	1/7	1/7	1/7	1/2	1	5	5	0,576	0,042
N_7	1/5	1/9	1/9	1/9	1/5	1/5	1	3	0,275	0,02
N_8	1/7	1/9	1/9	1/9	1/5	1/5	1/3	1	0,201	0,015

Попередньо обчислені значення компонент вектора пріоритетів варіантів модуляції по відношенню до показників якості наведені в табл. 3.45 (перші два стовпці). Тут же в останньому рядку наведено компоненти вектора пріоритетів показників якості. Обчислені згідно (3.5) компоненти вектора глобальних пріоритетів наведені в останньому стовпчику табл. 3.45.

Таблиця 3.45. Результати обчислення компонент вектора глобальних пріоритетів

Варіанти	P_1	P_2	C_i
N_1	0,117	0,078	0,09087
N_2	0,098	0,179	0,15227
N_3	0,045	0,25	0,18235
N_4	0,021	0,366	0,25215
N_5	0,038	0,049	0,04537
N_6	0,082	0,042	0,0552
N_7	0,214	0,02	0,08402
N_8	0,384	0,015	0,13677
P	0,33	0,67	

У розглянутій множині варіантів модуляцій в системі цифрового зв'язку за максимальним значенням компонент вектора глобальних пріоритетів переважним варіантом модуляції слід вибрати варіант N_4 . Йому відповідає система цифрового зв'язку з когерентної MPSK при числі позицій $M = 16$, відношенні сигнал/шум $E_b/N_0 = 18\text{дБ}$ і ефективності використання смуги пропускання $R/W = 4 \text{ біт} / \text{с} / \text{Гц}$.

3.9. Порівняльний аналіз і вибір переважного варіанту систем телевізійного мовлення стандартів DVB-T і ATSC

Розглянемо особливості застосування методу аналізу ієрархій для вибору варіанту телевізійного мовлення з різними стандартами: DVB-T з багаточастотною модуляцією COFDM і стандарту ATSC з 8-рівневою амплітудною модуляцією [6]. Основні показники якості для систем з ОЧП-8Т та COFDM наведені в табл. 3.46. Перевага систем телевізійного мовлення за кожним показником якості в таблиці зазначається кратним повторенням значка +.

Кожен варіант системи телевізійного мовлення має свої переваги і недоліки. В системі з ATSC сигнал стійкіший у гаусовому каналі, але менш чутливий до імпульсних шумів, має менше відношення пікової до середньої потужності в каналі, більш підходить для реалізації багаточастотних мереж мовлення (MFN). Обидві системи приблизно рівноцінні за впливом перешкод від аналогового телебачення і по впливу відбитих сигналів низького рівня. Система з DVB-T має переваги в умовах сильних відображень (до 0 дБ потужності відбитого сигналу в порівнянні з основним), при значному запізненні і випередженні відбитого сигналу, при динамічній багатопроемовості (що змінюється в часі), вона більш придатна для одночастотних мереж (SFN) і прийому в русі [6].

Таблиця 3.46. Порівняння систем телевізійного мовлення з різними стандартами

Характеристики систем телевізійного мовлення		Стандарт ATSC	Стандарт DVB-T
K_1	Характеристика системи в Гаусовому каналі, сигнал-шум, дБ	14,8	15,2
K_2	Ієрархічна модуляція	ні	так
K_3	Динамічна багатопроменевість	-	+++
K_4	Прийом всередині приміщення	-	+++
K_5	Прийом в русі	-	+++
K_6	Ефективність використання спектра MFN SFN	+ -	- +++
K_7	Імпульсні шуми	++	-
K_8	Гармонійна перешкода	-	++
K_9	Перешкоди від аналогових ТВ систем у співпадаючому каналі	однаково	однаково
K_{10}	Перешкоди від цифрового телебачення в співпадаючому каналі	++	-
K_{11}	Чутливість до фазовим шумів	++	-
K_{12}	Перешкоди аналоговим системам	низькі	середні

Ставлення пікової до середньої потужності сигналу. За інших рівних умов система з ОЧП-8Т має на 2,5 дБ нижче ставлення в 99,99% часу, що означає, що передавач з COFDM повинен мати більший запас потужності.

Багатопроме́нєве поширення. Система з ATSC має деяку перевагу при прийомі на спрямовану антену, встановлену високо на даху (рівень відбитої хвилі на 4...6 дБ нижче прямої), але зовсім втрачає цю перевагу при прийомі на переносному приймачі і особливо в умовах динамічної багатопроменевості.

Прийом всередині приміщення. Це питання вимагає подальших досліджень, але вже зараз ясно, що тільки система з COFDM може забезпечити стійкий прийом на кімнатну антену.

Прийом в русі. Як і для прийому в приміщенні, тільки система з COFDM придатна для прийому на рухомих транспортних засобах.

Ефективність використання спектра. У режимі MFN деяку перевагу має система з ATSC, так як через наявність захисного інтервалу швидкість передачі в канал знижується на 24% ($D = 1/4$), 19% ($D = 1/8$), 10% ($D = 1/16$) або 7% ($D = 1/32$). Однак у режимі SFN перевага система з DVB-T безперечна.

Імпульсні шуми. Теоретично система з COFDM повинна б мати більшу стійкість до імпульсних перешкод внаслідок усереднення коротких імпульсів в процесорі швидкого перетворення Фур'є на прийомі, однак канальне кодування та перемеження теж відіграють важливу роль. Завдяки більш глибокому перемеженню система з ATSC краще справляється з імпульсними шумами і викликаються ними пакетними помилками.

Гармонійна перешкода. Завдяки багаточастотному характеру COFDM наявність гармонійної або вузькополосної перешкоди зруйнує лише невелике число несучих і втрата даних буде незначна. Для одночастотної ОЧП-8Т вплив може виявитися більш істотним і привести до закриття глазкової діаграми. Перевага системи з COFDM досягає 10 дБ.

Перешкоди від аналогових ТВ систем в співпадаючому каналі. Хоча системи з COFDM і ОЧП-8Т використовують різні механізми для усунення впливу перешкоди, в цілому обидві системи успішно справляються з цим завданням.

Перешкоди від цифрового телебачення в співпадаючому каналі. Сигнали систем поводяться як гаусів білий шум і ця перешкода визначається відношенням сигнал-шум. Перевага має система з ОЧП-8Т.

Чутливість до фазовим шумів. Теоретично система з COFDM більш чутлива до фазовим шумів гетеродинів приймача, які викликають додаткове обертання фази парціальних несучих і розмивають ансамбль сигналів.

Ієрархічна модуляція. Здатність до ієрархічної модуляції, безперечно, дуже важлива властивість системи з COFDM, яким не володіє система з ОЧП-8Т. Потоки різного пріоритету можуть використовуватися для мовлення різних програм або однієї і тієї ж програми на різні частини зони обслуговування, або для різних категорій абонентів.

У табл. 3.47 наведені матриця парних порівнянь показників якості, а також обчислені згідно (3.2 – 3.5) оцінки компонент власного вектора і вектора пріоритетів.

Таблиця 3.47. Матриця парних порівнянь показників якості та обчислені компоненти головного власного вектора і вектора пріоритетів

Показники якості	Показники якості												$\vec{V}$	$\vec{P}$
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}	K_{12}		
K_1	1	3	5	7	7	5	3	5	5	5	5	7	4,3679	0,2413
K_2	1/3	1	3	5	5	3	4	7	7	7	5	5	3,4213	0,1891
K_3	1/5	1/3	1	5	5	3	3	3	5	5	7	7	2,4835	0,1372

Показники якості	Показники якості												$\vec{V}$	$\vec{P}$
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}	K_{12}		
K_4	1/7	1/5	1/5	1	4	6	5	3	3	5	3	5	1,6677	0,0921
K_5	1/7	1/5	1/5	1/4	1	4	3	7	7	5	3	5	1,4123	0,0781
K_6	1/5	1/3	1/3	1/6	1/4	1	5	3	3	3	5	7	1,1307	0,0624
K_7	1/3	1/4	1/3	1/5	1/3	1/5	1	3	5	5	5	7	0,9974	0,0551
K_8	1/5	1/7	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	1	5	3	5	7	1,0087	0,0557
K_9	1/5	1/7	1/5	1/3	1/7	1/3	1/5	1/5	1	6	3	5	0,6381	0,0353
K_{10}	1/5	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/3	1/6	1	4	2	0,3708	0,0205
K_{11}	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/4	1	3	0,3225	0,0178
K_{12}	1/7	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7	1/7	1/5	1/2	1/3	1		0,2789	0,0154

Для прикладу в табл. 3.48 приведена матриця парних порівнянь систем телевізійного мовлення відповідно до стандартів ОЧП-8Т (ATSC) і COFDM (DVB-T і ISDB-T), а також відповідного їй власного вектора і вектора пріоритетів по відношенню до характеристики системи в гаусовому каналі. Аналогічно проведено обчислення і по відношенню до інших показників якості [6].

Таблиця 3.48. Парні порівняння систем по відношенню до характеристики системи в гаусовому каналі

Характеристика системи в Гаусовому каналі	N_1	N_2	$\vec{V}$	$\vec{P}_j$
N_1	1	1/7	0,378	0,125
N_2	7	1	2,646	0,875

Отримані оцінки векторів пріоритетів для розглянутих систем $\vec{P}_{ij}$, $i = \overline{1, 12}, j = \overline{1, 2}$ в якості стовпців наведені в табл. 7.10. У цій таблиці наведено також отримані компоненти вектора пріоритетів показників якості $\vec{P}$. З їх

використанням обчислені згідно (3.2)-(3.5) значення компонент глобального вектора пріоритетів $\vec{c}$. Результати обчислень наведені в табл. 3.49.

Таблиця 3.49. Результати обчислення значень компонент вектора глобальних пріоритетів

Показники якості	Компоненти вектора пріоритетів показників якості $\vec{P}_n$	Компоненти вектора пріоритетів для систем з різними стандартами	
		$\vec{P}_x$ (стандарт ATSC)	$\vec{P}_x$ (стандарт DVB-T)
K_1	0,2413	0,125	0,875
K_2	0,1891	0,099	0,9
K_3	0,1372	0,25	0,75
K_4	0,0921	0,099	0,9
K_5	0,0781	0,099	0,9
K_6	0,0624	0,167	0,833
K_7	0,0551	0,833	0,167
K_8	0,0557	0,125	0,875
K_9	0,0353	0,334	0,666
K_{10}	0,0205	0,875	0,125
K_{11}	0,0178	0,833	0,167
K_{12}	0,0154	0,833	0,167
Значення компонент вектора глобальних пріоритетів C_i		0,2211	0,7789

Більшому значенню компонент вектора $\vec{c}$ відповідає переважний стандарт DVB-T.

3.10. Вибір переважного протоколу маршрутизації бездротової сенсорно-актуаторної мережі

В даний час активний розвиток отримали бездротові сенсорно-актуаторні мережі (БСАМ), які ефективно використовуються для вирішення прикладних завдань розподіленого збору інформації про контрольовані

параметри у мережах моніторингу. Такі мережі є гомогенними, самоорганізуючими, одноранговими, з комірчастою топологією, вузли яких здатні до ретрансляції інформації. Автономні джерела споживання у вигляді батарей в цих мережах накладають жорсткі обмеження по енергоефективності на всі протоколи маршрутизації, що застосовуються в сенсорних мережах. Тому для БСАМ важливими є завдання маршрутизації, зокрема, пошуку оптимальних з точки зору енергоефективності маршрутів і пошуку маршрутів, що забезпечують максимальний час життя мережі. Розвиток БСАМ призвело до появи великої кількості протоколів маршрутизації. Це визначає актуальність вибору переважного протоколу маршрутизації для конкретної реалізації. Високим попитом для бездротової сенсорно-актуаторних мереж використовуються наступні алгоритми маршрутизації:

- Централізовані алгоритми. Засновані на тому, що один вузол володіє знаннями про всю мережу. Ці алгоритми використовуються вкрай рідко через значні енерговитрати на передачу «головному вузлу» інформації про стан всієї мережі.
- Розподілені алгоритми. На відміну від попередніх алгоритмів, зв'язок підтримується за рахунок обміну інформації між вузлами.
- Алгоритми, засновані 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 безліч повідомлень, переданих тільки на центральний вузол, є перевагою. Використання розподілених алгоритмів потребує надійного і ефективного зв'язку між будь-якими парами вузлів. У свою чергу, алгоритми на основі розташування, ефективність яких забезпечується знанням географічних координат, наприклад, за допомогою GPS, роблять рішення більш дорогими [7,8].

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

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) є адаптивним протоколом маршрутизації, який дозволяє будувати маршрути передачі інформації з високою енергетичною ефективністю. Мережі, що використовують протокол SPIN, працюють з високорівневими дескрипторами даних – метаданими. Для того, щоб виключити передачу надлишкової інформації, в мережі використовуються узгодження мета-даних і знання про доступні ресурси. Це дозволяє вузлам ефективно розподіляти інформацію між ретрансляторами з обмеженням джерелом живлення.

Directed Diffusion – протокол маршрутизації, орієнтований на дані (data-centric). У мережах, що використовують даний протокол для маршрутизації, сенсорні вузли використовують зв'язку «атрибут-значення». Для

отримання даних вузол генерує запит за певною схемою, подібно роботі бази даних, де вузли виступають в ролі осередків даних. Зазвичай джерелом таких запитів є базова станція (БС). Вузли зберігають попередні запити, а при отриманні нового оновлюють кеш запити, що дозволяє визначати швидкість передачі даних. При отриманні повідомлення із запитом встановлюється зв'язок з відправником і при цьому активізуються датчики збору даних. Такий зв'язок називається градієнтом і характеризується швидкістю передачі даних, тривалістю і часом закінчення сеансу зв'язку. При отриманні запиту вузол намагається встановити якомога більше градієнтів в напрямку до БС. Для пошуку оптимального варіанта використовуються позитивні і негативні підкріплення. Також алгоритм маршрутизації працює з двома видами градієнтів: «розвідувальний» і градієнт даних. Перший призначений для налагоджування маршруту, а другий – для відправки даних.

Rumor Routing. Цей протокол маршрутизації має використання запитів від БС, які поширюються по всій мережі вузлів, які спостерігали події, відображені в запиті. Для цього вузол, який фіксує зміну контрольованого параметра, передає пакет, який називається агентом. Агенти поширюються по мережі, агрегую дані від інших вузлів з подіями, в напрямку БС. Для уникнення утворення петель, агенти зберігають список відвіданих вузлів. Крім доставки інформації, агенти дозволяють підтримувати актуальні знання про мережу кожним вузлом, оновлюючи інформацію з агента. Тим не менш, деякі вузли можуть не отримувати цю інформацію, тому, що агент поширюється між деякими сусідніми вузлами випадковим чином.

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). У цьому протоколі маршрутизації роль глави кластера періодично виконують різні вузли мережі для рівномірного використання енергії. Перевага LEACH у використанні циклів. У кожному циклі заноно вибирається голова кластера з числа вузлів, які не були головами кластерів, і для забезпечення відсотка глав кластерів щодо загального числа вузлів мережі. Потім голова кластера розсилає розклад для доступу з тимчасовим поділом (TDMA) всередині кластера. Це дозволяє вузлам включати передачу тільки тоді, коли голова кластера вільний. Також голова кластера відповідає за агрегацію даних, отриманих від вузлів свого кластера, для усунення надмірності.

Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN). У цьому протоколі маршрутизації роль на відміну від ієрархічних протоколів використовується для реактивних мереж, які негайно реагують на зміну різних параметрів. У цьому протоколі глава кластера розсилає порогові значення (hard і soft), при досягненні яких вузол передає інформацію. Якщо параметр з набору атрибутів досягає жорсткого порогового значення, вузол включає передавач і передає дані. Потім інші вузли передають дані у відповідному часовому проміжку при виконанні наступних умов: поточне значення атрибутів більше hard порога і поточне значення атрибута відрізняється від заданого значення на величину, рівну або більшу, ніж soft поріг. Обидві стратегії спрямовані на зменшення витрат енергії на передачу повідомлень.

Основним недоліком цього протоколу маршрутизації є те, що якщо контрольоване значення не досягне порогового рівня, то вузли не будуть зв'язуватися між собою, користувач не отримає ніякої інформації і не буде

обізнаний про працездатність мережі. Таким чином, даний алгоритм непридатний для додатків, де передача інформації повинна бути регулярна.

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS). Це протокол маршрутизації вважається поліпшенням протоколу LEACH. Замість розподілу вузлів в кластери він передбачає формування мережі сенсорних вузлів. На основі цієї структури кожен вузол передає і приймає інформацію тільки від одного найближчого сусіднього вузла. Це дозволяє регулювати потужність передачі. Вузол виконує агрегацію даних, пересилає їх по мережі до базової станції. У кожному циклі тільки один вузол з мережі взаємодіє з базовою станцією. Мережа будується з максимальною ефективністю за енерговитратами.

Self-Organizing Protocol (SOP). Цей протокол маршрутизації і самоорганізації використовується в гетерогенних сенсорних мережах з 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. Вони є стаціонарними і утворюють основну мережу комунікації. Зібрані дані передаються маршрутизаторами на більш потужні базові станції. Кожен крайовий вузол повинен мати можливість зв'язатися хоча б з одним шлюзом, щоб бути частиною разом із сенсорною мережі. Прикінцеві вузли можуть бути ідентифіковані за допомогою адреси маршрутизатора, якому вони передають інформацію. Таким чином, формується ієрархічна архітектура, де групи вузлів формуються і об'єднуються в разі потреби.

Geographic Adaptive Fidelity (GAF). Протокол маршрутизації спрямований на оптимізацію продуктивності БСМ за рахунок пошуку еквівалентних вузлів з точки зору передачі інформації. Еквівалентними вважаються такі вузли, які можуть підтримувати зв'язок одним і тим же способом з множиною сусідніх вузлів. Для визначення еквівалентних вузлів необхідно знати глобальне (або, принаймні, локальне) місце розташування вузлів мережі. Формується віртуальна сітка з таким розміром «комірок», щоб всі вузли «комірок» могли взаємодіяти з вузлами сусідніми і навпаки. Таким чином, вузли в одній «комірці» – еквівалентні. Для забезпечення енергоефективності тільки один з вузлів в «комірці» буде забезпечувати зв'язок, в той час як інші будуть резервними.

Geographic and Energy and Aware Routing (GEAR). Протокол маршрутизації, який також заснований на знанні розташування вузлів. Локалізація відбувається за допомогою систем глобального позиціонування або іншим систем. Вибір вузла-ретранслятора для побудови маршруту ґрунтується на евристичному виборі із множини сусідніх вузлів. Маршрути, побудовані з використанням протоколу GEAR, утворюються за рахунок рекурсивної географічної передачі пакета всередині сенсорного поля. Таким чином, досягається висока енергоефективність при використанні в тимчасових мережах.

Sequential Assignment Routing (SAR). Це один з перших протоколів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах, який забезпечує поняття Quality Of Service (QoS – якість послуг) критеріїв маршрутизації. Він базується на виставленні атрибутів рівня пріоритету кожного пакета. Крім того, зв'язки і маршрути мають метрику, що характеризує їх можливість забезпечити якість обслуговування. Ця метрика визначається затримками і енерговитратами. На

основі алгоритму створюється дерево маршрутів з коренем в одному *hop'e* від базової станції. Для цього враховуються кілька параметрів, таких як пріоритет пакетів, енергетичні ресурси, показники QoS. Також протокол періодично актуалізує маршрути, щоб реагувати на вихід з ладу одного з активних вузлів.

A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks (SPEED). Це 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. Крім того, протокол прагне забезпечити певну швидкість доставки кожного пакета. Таким чином, можна заздалегідь оцінити затримане проходження пакета від відправника до одержувача, розділивши відстань на швидкість пакета. Також SPEED дозволяє знаходити обхідні маршрути в разі перевантажень мережі. Модуль маршрутизації в протоколі SPEED називається Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding (SNFG) і працює з чотирма іншими модулями на мережному рівні. Оцінка затримки на кожному вузлі ґрунтується на визначенні часу, що минув після запиту підтвердження отримання переданого пакета даних. Виходячи із значення затримки, SNFG вибирає вузол, який відповідає вимогам по швидкості обробки. Якщо такого немає, розглядаються сусідні вузли [7,8].

У табл. 3.50 представлені узагальнені характеристики розглянутих протоколів маршрутизації.

Таблиця 3.50. Узагальнені характеристики різних протоколів маршрутизації в БСМ

№	Протоколи маршрутизації	Мобільність	Споживна потужність	Согласованість	Агрегація даних	Локалізація	QoS	Складність структури	Масштабованість	Множинність шляхів
N_1	SPIN	Можлива	Обмежена	Так	Так	Ні	Ні	Низька	Обмежена	Так
N_2	Directed Diffusion	Обмежена	Обмежена	Так	Так	Ні	Ні	Низька	Обмежена	Так
N_3	Rumor Routing	Дуже обмежена	Не визначена	Ні	Так	Ні	Ні	Низька	Хороша	Ні
N_4	LEACH	Фіксовані БС	Максимальна	Ні	Так	Так	Ні	Головні вузли кластера	Хороша	Ні
N_5	TEEN	Фіксовані БС	Мінімальна	Ні	Так	Ні	Ні	Головні вузли кластера	Хороша	Ні
N_6	PEGASIS	Фіксовані БС	Максимальна	Ні	Ні	Так	Ні	Низька	Хороша	Ні

№	Протоколи маршрутизації	Мобільність	Споживна потужність	Согласованість	Агрегація даних	Локалізація	QoS	Складність структури	Масштабованість	Множинність шляхів
N_7	SOP	Ні	Не визначена	Ні	Ні	Ні	Ні	Низька	Низька	Ні
N_8	GAF	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Так	Ні	Низька	Хороша	Ні
N_9	GEAR	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Так	Ні	Низька	Обмежена	Ні
N_{10}	SAR	Ні	Невизначена	Так	Так	Ні	Так	Середня	Обмежена	Ні
N_{11}	SPEED	Ні	Невизначена	Ні	Ні	Так	Так	Середня	Обмежена	Так

Розглянемо особливості застосування методу аналізу ієрархій для вибору єдиного переважного протоколу маршрутизації в БСАМ з урахуванням сукупності показників якості. Були взяті дані 11 протоколів маршрутизації (табл. 3.50).

У табл. 3.51 показані результати оцінки матриць парних порівнянь десяти експертів і вектор пріоритетів, обчислений відповідно до (3.2-3.5) і потім обчислений середній вектор пріоритетів [6-8].

Таблиця 3.51. Вибір переважного протоколу маршрутизації БСАМ

Протоколи	Оцінки парних порівнянь 10 експертів (P_j)										Середня оцінка вектора пріоритетів 10 експертів
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	
N_1	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,0442
N_2	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,05	0,09	0,08	0,077
N_3	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,06	0,04	0,0589
N_4	0,10	0,10	0,13	0,05	0,11	0,1	0,1	0,11	0,14	0,10	0,1103
N_5	0,14	0,16	0,09	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,15	0,1426
N_6	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,0237

Протоколи	Оцінки парних порівнянь 10 експертів (P_j)										Середня оцінка вектора пріоритетів 10 експертів
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	
N_7	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,0299
N_8	0,20	0,19	0,23	0,2	0,19	0,19	0,22	0,2	0,19	0,20	0,2076
N_9	0,28	0,27	0,25	0,29	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,2721
N_{10}	0,01	0,01	0,02	0,02	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,023
N_{11}	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0145

З табл. 3.51 видно, що згідно МАІ переважним варіантом БСАМ є протокол маршрутизації N9 – GEAR, який відповідає максимальній компоненті вектора пріоритетів [7,8].

Перевагою використання методу аналізу ієрархій для вибору переважного варіанту протоколу маршрутизації є врахування суджень експертів і подальша формалізована процедура обробки отриманих даних для вирішення такого завдання вибору.

Висновки

1. Для вибору переважного проектного варіанту засобів зв'язку з урахуванням сукупності показників якості слід застосовувати умовні критерії переваги, які засновані на використанні деякої додаткової інформації від експертів.

2. Розглянуто формування умовного критерію переваги на основі методу аналізу ієрархій. Цей метод полягає в декомпозиції проблеми вибору переважного варіанту системи на прості складові частини і отриманні суджень експертів по парним порівнянням різних елементів проблеми вибору. В результаті обробки отриманих чисельних даних суджень обчислюється вектор глобальних пріоритетів, компоненти якого визначають пріоритетність вибору варіантів проекрованої системи.

3. Досліджено практичні особливості застосування МАІ для вибору переважного варіанту з урахуванням сукупності показників якості на прикладі різних типів засобів зв'язку, зокрема, мовних кодеків для IP телефонії, системи масового обслуговування заявок, проектних варіантів систем мобільного зв'язку 3-го покоління, технологій мобільного зв'язку 4-го покоління, типів мобільних телефонів, протоколів маршрутизації в ad-hoc мережах, модуляції в цифрових

системах зв'язку, систем телевізійного мовлення стандартів DVB-T і ATSC, протоколів маршрутизації бездротової сенсорно-актуаторної мережі.

Література

1. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
2. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 176 с.
3. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
4. Saati P. Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs and Risks. – Pittsburgh, 2005. – 352 p.
5. Безрук В.М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в авто-матизованому проектуванні систем зв'язку. – Харків: ХНУРЕ, 2002. – 164 с.
6. Безрук В.М., Чеботарева Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций. – Харьков: СМИТ, 2017. – 256 с.
7. Bezruk V., Zelenin A., Vlasova V., Skorik J., Koltun Y. Select preferred of wireless sensor and actuator network // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 1/9 (79). – 2016. – P.4-9.
8. Безрук В.М., Власова В. О., Скорик Ю. В., Колтун Ю. М., Костромицкий А. І. Анализ протоколов маршрутизации беспроводной сенсорно-актуатор-ной сети и метод их выбора // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ. – №1 (76). – 2017. – С. 28-33.