

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.

8. МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ХЕНДОВЕРУ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ

Глоба Л.С., Кірюшкін Р.О, Курдеча В.В.

8.1. Аналіз існуючих методів та алгоритмів прийняття рішень щодо вертикального хендвера

Вертикальний хендвер дозволяє реалізувати швидке, плавне перемикання між різними мережами, однак розробка і впровадження механізмів безшовного хендверу є величезною проблемою і активною сферою для досліджень. Тому розробка модифікованого методу вертикального хендверу є актуальною для підвищення ефективності та якості зв'язку у гетерогенних бездротових мережах.

Основні вимоги до хендвера наступні: низькі затримки процедури, висока надійність, високий рівень успішності процедури, мінімальна кількість хендверів (оскільки часті переключення призводять до значних енерговитрат та витрат корисної пропускну здатності мережі), мультикритеріальність – тобто врахування множини параметрів, забезпечення прозорого переміщення абонента, балансування навантаження на мережі радіодоступу [1-2]. Техніка вертикального хендвера повинна обирати найбільш доречний момент його ініціювання та найбільш придатну мережу радіодоступу серед усіх доступних.

Найбільш складним завданням в вертикальному хендвері є мінімізація втрати даних і часу переривання, точність прийняття рішення про вибір найбільш відповідної мережі в той час, як мобільний термінал знаходиться в прозорому стані під час процесів перемикання [2].

8.2. Класифікація стратегій вертикального хендвера

1. Традиційні методи

Традиційні методи використовують критерій RSS з іншими параметрами, як критерії для прийняття рішень. Алгоритми, засновані на RSS, доволі прості. Рішення про передачу мобільного вузла від поточної мережі в іншу, головним чином, залежить від рівня сигналу. Основним недоліком таких алгоритмів є генерування великої кількості запитів, оскільки інтенсивність сигналу не може бути точно виміряна через втрати на трасі та завмирання сигналу [3].

2. Користувальницькі підходи

Такі підходи розглядаються з точки зору досягнення максимального рівня задоволеності користувачів. Уподобання наведені у вигляді вартості і якості обслуговування. При цьому фактична швидкість передачі даних кожної мережі обчислюється за допомогою мобільного терміналу. Вона використовує функцію передбаченої швидкості та користі для визначення, яка мережа найкраще підходить для повної передачі даних з максимальною користю [4].

3. Нечітка логіка і нейронні мережі

Іншим підходом до агрегації параметрів та обчислення критерію оптимізації вибору мережі призначення вертикального хендвера є застосування механізмів штучного інтелекту: еволюційних обчислень genetic algorithm (GA), фаззі-логіки, нейронних мереж та комбінування їх між собою, а також залучення до прийняття рішення такого математичного методу як теорія ігор [5],[6]. Проте, важливим залишається баланс складності та швидкодії, тому що обчислення за занадто складним алгоритмом може вносити значні затримки у процедуру хендвера, що є небажаним. Апарат фаззі-логіки дозволяє моделювати якісні аспекти експертних знань людини та її міркування щодо процесу обробки хендвера за допомогою так званих «правил мислення», а також дозволяє обробляти неточні та недостовірні результати вимірювання параметрів наявних мереж. З іншого боку, нейронні мережі при використанні повного набору вхідних параметрів та бажаних вихідних, можуть бути натреновані для оптимального здійснення процедури вертикального хендвера. І нарешті, може використовуватися комбінація фаззі-логіки з нейронними мережами або з генетичними алгоритмами для організації адаптивних механізмів оптимального вертикального хендвера. Вертикальний хендвер, який використовує ці два поняття було запропоновано у роботі [6]. У цьому алгоритмі нейронна мережа використовується в якості базової системи.

4. Контекстні алгоритми.

Ці алгоритми вибирають кращу мережу серед доступних мереж на основі мобільного терміналу і мережевої інформації. Вони роблять баланс між попитом користувачів і станом мережі. Алгоритм рішення на основі аналітичного процесу ієрархій представлений у роботі [7]. Механізм передачі обслуговування призначений для вертикального ініціювання передачі обслуговування і прийняття рішення щодо змін в контексті.

5. Основані на функціях витрат

Вертикальний хендвер на основі функції витрат вимірює вигоду, отриману від перемикання. До першої політики включена стратегія передачі обслуговування, що запропонована у роботі [8]. В роботі використано функцію вартості, щоб вибрати кращу доступну мережу. Цей алгоритм дозволяє користувачам вибирати такі параметри, як вартість, продуктивність і споживання енергії за їх побажаннями. Але функція вартості в даній роботі має дуже попередній характер і не може впоратися зі складними конфігураціями.

Інша політика роботи на основі запропонованого метода [9], де спеціальний автоматичний менеджер хендвера надає рішення для вибору кращої цільової мережі на основі автоматичних обчислювальних концепцій.

У роботі [10] було запропоновано динамічну модель прийняття рішення для алгоритму прийняття рішень вертикального хендвера. В ній було розраховано функцію рахунку для кожного мережі – кандидата. Мережа з найбільшим значенням функції обирається найліпшою альтернативою.

6. Мультикритеріальні методи.

Множинний алгоритм вибирає альтернативну мережу з набору альтернатив, які характеризуються з точки зору їх атрибутів. Існують декілька типів мультикритеріальних методів:

1. Метод простого адитивного зважування Simple Additive Weighting (SAW) [11]. У цьому методі загальна оцінка кандидата в мережі визначається зваженою сумою всіх значень атрибутів.
2. Метод сірого реляційного аналізу Grey Relational Analysis (GRA). Використовується ранжирування усіх мереж—кандидатів, а потім відбувається вибір мережі з найвищим значенням рейтингу [9].
3. Алгоритм, залежний від параметрів Quality of Service (QoS). Алгоритм складається з обчислення функції прийняття рішень і фактору вартості. Мережа з найвищою якістю і низькою вартістю обирається як цільова мережа для передачі обслуговування.
4. Техніка наближеності до ідеального рішення Techniques for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [12]. Це техніка ранжування за наближеністю до ідеального рішення і віддаленістю від найгіршого. Цей метод можна застосовувати для параметрів з монотонно змінюваними рівнями корисності. Алгоритм розраховує позитивне і негативне ідеальні рішення, виходячи з набору значень параметрів, доступних для вибору.
5. Метод MULTiplicative form with Multi Objective Optimization Ratio Analysis (MULTIMOORA) [13]. Цей метод є новою і потужною MCDM технікою, яка об'єднує три підходи ранжирування: систему відносин, систему точок відліку та мультиплікативну форму за допомогою теорії домінування. MULTIMOORA простий, надійний і точний в порівнянні з іншими MCDM методами для ранжирування альтернативних мереж.

8.3. Класифікація алгоритмів прийняття рішень щодо вертикального хендвера

Існує безліч теоретичних розробок щодо алгоритмів вертикального хендвера, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Вони відрізняються набором параметрів, що враховуються при оцінці мереж-кандидатів, механізмом запуску вертикального хендвера, а також алгоритмом вибору мережі призначення.

Кожен з цих алгоритмів має свої недоліки, що як правило, пов'язані з обмеженим набором параметрів, який не завжди враховує або параметри якості, або вартість послуг, або політику користувача; і дуже небагато з них знаходять реальну практичну реалізацію. Тому вкрай важливим є знаходження балансу між обраним набором параметрів, складністю системи їх обробки та якістю обслуговування для кінцевих користувачів.

Аналіз деяких з алгоритмів представлений у табл. 8.1 [17]:

Таблиця 8.1. Порівняльна характеристика алгоритмів прийняття рішень

Назва алгоритму	Метод	Параметри	Переваги	Недоліки
На основі RSS	Традиційний	RSS, час очікування	Зменшує блокування хендоверу	Низька пропускна здатність
Оснований на Марковських процесах	Орієнтований на користувача	Тривалість з'єднання, затримка, пропускна здатність, вартість, швидкість	Скорочення падінь викликів, вартість підключень	Збільшення падінь викликів при збільшенні швидкості користувача
Кросшаровий	Орієнтований на користувача	Вподобання користувача	Зменшує затримку передачі обслуговування	Багато входів з різних рівнів та користувачів для виконання хендоверу
ANP	MADM	Пропускна здатність, затримка, джитер, втрати пакетів, вартість, безпека	Зменшує час затримки перемикання каналів зв'язку	Значення RSS менше порогового не враховується
SAW	MADM	Пропускна здатність, затримка, джитер, втрати пакетів	Зменшення затримки обробки і передачі обслуговування	Розглядається мінімальна кількість параметрів
TOPSIS	MADM	Швидкість передачі даних, пропускна здатність, вартість	Відмінна продуктивність вимог трафіку і користувачів	Параметри QoS не розглядаються
Залежний від параметрів QoS	Fuzzy	Смуга пропускання, джиттер, затримка, частота появи помилок	Висока продуктивність для чутливих до затримок додатків	Помірна пропускна здатність та продуктивність

На сьогоднішній день одними з найкращих методів та алгоритмів являються мультикритеральні методи прийняття рішень. Вони надають більш ніж одну цільову мережу в якості альтернативних рішень, а також забезпечують

гнучкість у виборі критеріїв для вирішення про перехід в кращу мережу. Комбінація класифікаторів допоможе у визначенні правильного рішення про хендовер в неоднорідних бездротових мережах і допоможе використовувати переваги різних бездротових мереж.

Також, на сьогоднішній день великою проблемою постає оптимізація хендовера при групових викликах, коли з одного мобільного вузла (МВ) відбувається запит на перемикання з різними типами трафіку, наприклад голосового трафіку, трафіку завантаження файлів та трафік потокового відео.

8.4. Модифікація методу вертикального хендоверу

Основною метою вертикального хендовера є поліпшення якості обслуговування і забезпечення прозорості мобільності в гетерогенній мережі. Для забезпечення цих функцій необхідно оптимально обрати момент здійснення перемикання та вибрати найбільш придатну мережу призначення. Також алгоритм хендовера повинен бути компромісом швидкодії і кількості хендоверів.

Головною перевагою розробленого методу є комбінування двох алгоритмів прийняття рішень при різних типах викликів мобільного вузла, що дозволить підвищити ефективність зв'язку у гетерогенних бездротових мережах.

8.4.1. Модифікація методу вертикального хендоверу

За основу модифікації методу вертикального хендовера було використано стандарт 802.21, який був прийнятий у 2008 році та носить назву «Хендовер, незалежний від середовища передавання»

Для модифікації методу вертикального хендовера було запропоновано використовувати саме два мультикритеріальні методи прийняття рішень:

Перший – TOPSIS для одиночних викликів, оскільки він має концептуальну простоту і гідну ефективність обчислень, можливість вимірювати відносну продуктивність для кожної альтернативи, а також забезпечує високу пропускну здатність і зменшує втрату пакетів.

Другий – MULTIMOORA для групових викликів, оскільки цей метод має потужну техніку ранжирування мереж шляхом об'єднання трьох підходів ранжирування: системи відносин, системи точок відліку і мультиплікативну форму за допомогою теорії домінування, високу точність прийняття правильного рішення щодо вертикального хендоверу при високих швидкостях пересування мобільних вузлів через гетерогенну мережу.

Запропонована функціональна архітектура вертикального хендовера приведена на рис. 8.1. Система складається з блоків збору і зберігання даних, блоку прийняття рішення та блоку виконання хендовера

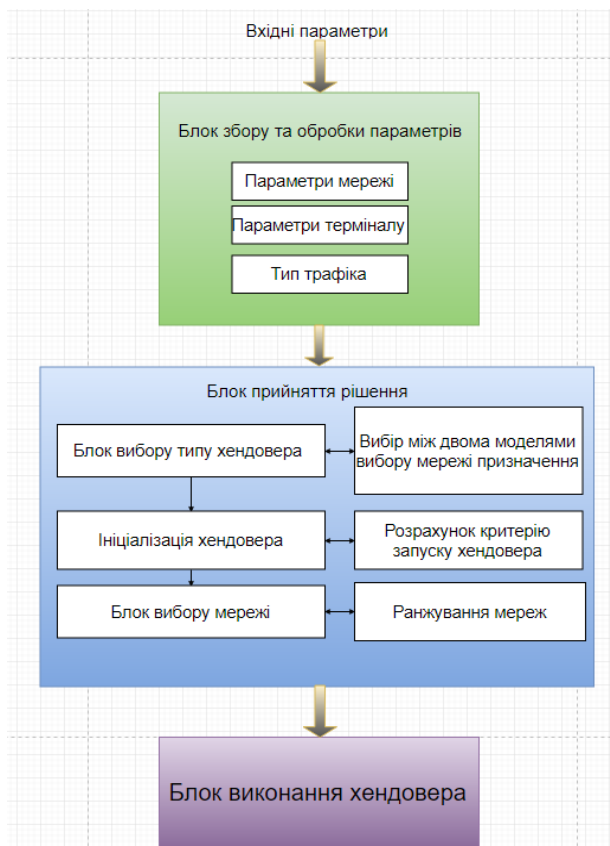


Рис. 8.1. Модифікована архітектура вертикального хендвера

Проведемо більш детальний опис архітектури:

- 1) Блок збору і обробки даних відповідає за перший етап вертикального хендверу і за допомогою періодичного сканування радіочастотного діапазону, спілкування з мережами доступу зберігає статичні і динамічні параметри, необхідні для ініціації хендверу і вибору мережі призначення.
- 2) Блок прийняття рішення відповідає за другу фазу хендверу – а саме, визначення «коли?» і «в якій мережі?» буде здійснена процедура перемикавання. Блок прийняття рішення складається з блоків ініціації хендверу, блоку вибору алгоритму прийняття рішення і з блоку вибору мережі.
- 3) Блок ініціації хендверу постійно запитує параметри з попереднього блоку збору даних, аналізує їх і вирішує, чи взагалі необхідний процес

хендоверу. Коли одна або більше умов запуску хендоверу задовольняються, то запускається процес сканування спектра.

- 4) Блок вибору типу хендовера на основі якого, відбувається поодинокий виклик або відразу кілька викликів різних класів трафіку. Блок приймає рішення про вибір одного з двох мультикритеріальних алгоритмів прийняття рішень.

У випадку простого поодинокого виклику, тобто, коли мобільний вузол виконує операцію тільки з одним типом трафіку, наприклад, при перегляді потокового відео, хендовер відбувається за допомогою ефективного, простого та швидкого алгоритму TOPSIS. Водночас, коли система вертикального хендовера бачить, що на мобільному вузлі одночасно запущені декілька операцій з різними типами трафіку (голосовий виклик, перегляд потокового відео, процес завантаження файлів), для найбільш ефективного виконання хендовера використовується алгоритм MULTIMOORA, який забезпечує максимальну ефективність та мінімальну кількість помилок при високих швидкостях пересування мобільних вузлів через гетерогенну мережу з груповими викликами.

Загальна блок-схема алгоритму вертикального хендовера на основі функціональної архітектури наведена на рис. 8.2.

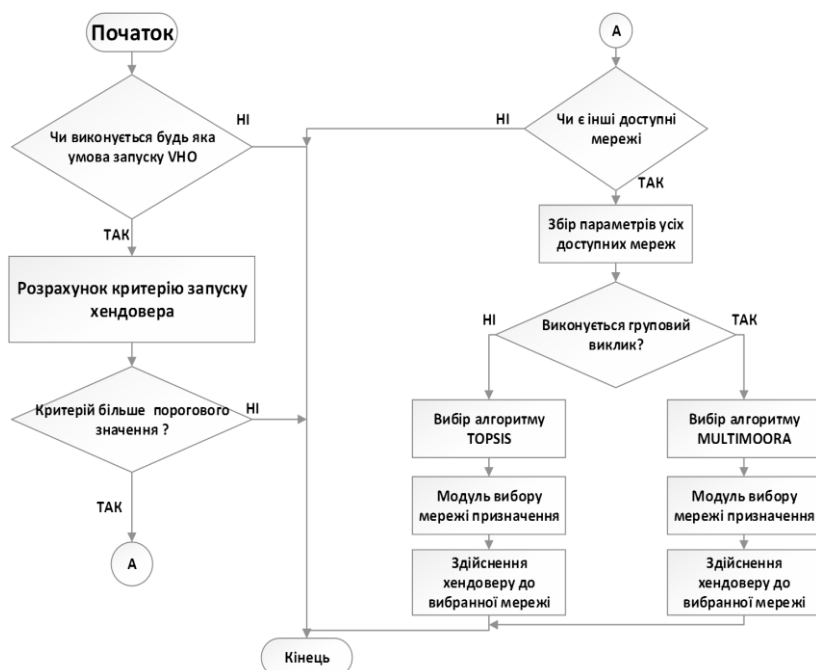


Рис. 8.2. Загальна блок-схема алгоритму модифікованого методу

8.5. Математична модель вибору мережі призначення TOPSIS

Базовий принцип алгоритм TOPSIS полягає в тому, що обраний кандидат повинен бути якомога ближчим до ідеального та найбільш відстороненим від найгіршого варіанту.

При цьому, ідеальне рішення – це набір параметрів з найкращими показниками серед усіх альтернатив, а найгірше, відповідно, – набір найгірших значень критеріїв. Також алгоритм передбачає розрахунок відносної евклідової відстані (наближеності) мережі-кандидата до ідеального рішення. Алгоритм включає у себе наступні кроки [13]:

Перший крок – формування матриці рішень D розмірності m, n , що містить набір альтернативних рішень зі значеннями критерію для них.

$$D = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix},$$

де $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ – альтернативні мережі-кандидати для хендвера;
 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – критерії;

$d_{i,j}$ – значення j -го критерію i -ї мережі-кандидата.

Другий крок алгоритму – нормування матриці рішень за наступним рівнянням:

$$r_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m d_{i,j}^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n,$$

де $r_{i,j}$ – це нормоване значення елемента $d_{i,j}$.

Третій крок – побудова виваженої нормованої матриці рішень, кожен елемент якої дорівнює:

$$v_{i,j} = r_{i,j} * w_{i,j},$$

де $w_{i,j}$ – це ваговий коефіцієнт.

Четвертий крок – побудова найкращого і найгіршого рішення:

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = \{(max_i v_{ij} | j \in C_B), (min_i v_{ij} | j \in C_C)\} \\ A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = \{(max_i v_{ij} | j \in C_B), (min_i v_{ij} | j \in C_C)\},$$

де C_B, C_C – множини прибуткових та витратних типів критерію.

Далі необхідно зробити розрахунок евклідової відстані до найкращого та найгіршого рішення:

$$S^+ = \sqrt{(v_{ij} - v_i^+)^2}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

$$S^- = \sqrt{(v_{ij} - v_i^-)^2}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

П'ятий крок – розрахунок відносної наближеності до найкращого рішення: $C_i = \frac{S^-}{S^- + S^+}, i = 1, 2, \dots, m$

Саме спираючись на відносну відстань до найкращого вирішення, здійснюється ранжування мереж-кандидатів для хендOVERу. Обирається мережу з найвищим значенням C_i , але при наступній умові:

$$C_{i_нов} > C_{i_поточ} + \theta,$$

де θ – деяке порогове значення, яке призначене для мінімізації впливу частих надлишкових хендOVERів (ефекту «пінг-понгу»).

Однак наявність гістерезису додає затримку в прийнятті рішення щодо хендOVERа.

8.6. Математична модель вибору мережі призначення MULTIMOORA

MULTIMOORA є новою і потужною Multi-Attribute Decision Making (MCDM) технікою, яка об'єднує три підходи ранжирування: систему відносин, систему точок відліку та мультиплікативну форму за допомогою теорії домінування. MULTIMOORA — метод простий, надійний і точний в порівнянні з іншими MCDM методами для ранжирування альтернативних мереж, вперше був запропонований в роботі [14]. Алгоритм включає у себе наступні кроки:

Перший крок – формування матриці рішень D розмірності m, n , що містить набір альтернативних рішень зі значеннями критерію для них:

$$D = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (8.1)$$

де $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ – альтернативні мережі-кандидати для хендOVERу;

$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – критерії;

$d_{i,j}$ – значення j -го критерію i -ї мережі-кандидата.

Другий крок – обчислення зваженого за Евклідом нормалізованого значення $r_{i,j}$ для i -ої альтернативи по відношенню до j -го критерію в якості:

$$r_{i,j} = \frac{d_{i,j} * w_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^m d_{i,j}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n,$$

де $r_{i,j}$ – це нормоване значення елемента $d_{i,j}$;

w_j – ваговий коефіцієнт.

Найбільше значення критерію $r_{i,j}$ називають критерієм вигоди, а найменше – критерієм вартості. Всі критерії вигоди та вартості підсумовуються.

Третій крок – розрахунок індексу співвідношення рангу y_i для i -ої альтернативи. Ця частина підходу заснована на системі відносин. Щоб обчислити відносну значимість y_i кожної альтернативи і до критеріїв j , зважені нормовані значення критеріїв повинні бути додані в разі максимізації, в той час, як в разі мінімізації, зважені значення нормованих критеріїв повинні бути відняті наступним чином:

$$y_i = \sum_{j=1}^k r_{i,j} - \sum_{j=k+1}^n r_{i,j}, \quad (8.2)$$

де $j = 1, 2, \dots, k$ – максимальні критерії прийняття рішень;

$j = k + 1, k + 2, \dots, n$ – мінімальні критерії;

k – кардинальне (головне) значення критерію вигоди.

Найвище значення показника співвідношення рангів y_i являє собою найвище значення системи ранжування i -ої альтернативи.

Четвертий крок заснований на максимально об'єктивній точці відліку. По-перше, має бути встановлена бажана ідеальна альтернатива. Віртуальна ідеальна альтернатива складається з найкращих значень розглянутих критеріїв $r_{i,j}$. Вона формується шляхом вибору оптимальних значень критеріїв від кожного прийняття альтернативи на основі їх напрямків оптимізації, тобто максимальні значення критеріїв $j = 1, 2, \dots, k$ та мінімальні значення критеріїв $j = k + 1, k + 2, \dots, N$.

Усі значення критеріїв перетворюються шляхом застосування вектора нормалізації. Маючи безрозмірні значення критеріїв і відносних значень (ваги) критеріїв, альтернативні рішення ранжуються на основі Чебишовської метрики Min-Max в порядку зростання: $y_i^* = \min_i (\max_j (s_j - r_{i,j}))$

Чим нижче рейтинг індекс y_i з i -тої альтернативи, тим вище ранжування в точковій системі відліку.

Опорні точки $s_j = \max_j (r_{i,j})$ і $s_j = \min_j (r_{i,j})$ визначені для критеріїв прибутку і витрат відповідно.

П'ятий крок заснований на повній мультиплікативній формі. Повна мультиплікативна форма для розрахунку корисності альтернатив U_i застосовується наступним чином:

$$U_i = \frac{A_i}{B_i}, \quad (8.3)$$

де A_i та B_i розраховуються окремо для максимальних критеріїв $j = 1, 2, \dots, k$ та мінімальних $j = k + 1, k + 2, \dots, N$ відповідно, і обчислюються наступним чином:

$$A_i = \prod_{j=1}^k d_{i,j}^{w_j}$$
$$B_i = \prod_{j=k+1}^N d_{i,j}^{w_j}.$$

Чим вищий ранг індексу U_i , тим вище мультиплікативна форма рангу i -тої альтернативи.

Ранжування альтернативи MULTIMOORA засновано на домінуванні в системах відносин, опорній точці та мультиплікативній формі. Ранжирування системи MULTIMOORA є безрозмірними заходами, і всі вони мають однакову вагу важливості.

Існують три типи правил домінування: абсолютне домінування, головне домінування і домінування в загальному і цілому. i -та альтернатива має абсолютне домінування на тій чи іншій позиції рангу, якщо кожна система ранжирування займає альтернативу за значенням 1 ($M = (1, 1, 1)$).

Методика ранжирування MULTIMOORA забезпечує бал ранжирування для кожної і-ої альтернативи на кожній позиції [20].

8.7. Імітаційне моделювання модифікованої моделі алгоритму прийняття рішення

Для дослідження і оцінки ефективності запропонованого рішення необхідно здійснити імітаційне моделювання, оскільки доступу до реальної гетерогенної інфраструктури для апробації результатів в межах роботи не передбачено. Моделювання буде проводитись у середовищі розробки Matlab і складатися з двох частин.

У першій частині роботи було зроблене моделювання математичної моделі алгоритму прийняття рішення для простого випадку з одиничними викликами та порівняння результатів з іншими відомими мультикритеріальними алгоритмами.

У другій частині роботи було зроблене моделювання математичної моделі алгоритму прийняття рішення для групових викликів та графічно показано переваги даного алгоритму.

8.7.1. Моделювання математичної моделі алгоритму прийняття рішення для одиничних викликів

Для проведення експерименту було використано 5 машин (серверів). Серед них 3 належали до одного типу (мали подібні фізичні характеристики), а 2 інші – до другого типу. Характеристики машин кожного типу наведені у табл. 8.1.

За вхідні дані для хендовера з одиночними викликами були узяті значення таких параметрів: тип мережі (WLAN, UMTS, WiMAX), тип трафіку (голосовий, завантаження файлів, завантаження потокового відео), швидкість передачі даних (мб/с), затримка пакетів (мс), джитер (мс), частота втрати пакетів (%), вартість мережі та її безпечність, тип мережі, тип трафіку [13].

Одним з важливих питань у виборі мережі є присвоєння відповідних ваг різними критеріями відповідно до поточної класу трафіку користувача. Голосовий трафік дуже чутливий до затримки і джитеру, трафік завантаження файлів дуже чутливий до швидкостей втрати пакетів і передачі даних, в той час, як трафік потокового відео має високу чутливість до швидкості передачі даних, затримки і джитера. Значення вхідних даних представлено у табл. 8.1.

На основі апробованих даних результатів інших мультикритеріальних моделей прийняття рішень [15],[16] можна зробити порівняльну характеристику представлених алгоритмів. Порівняльна характеристика ранжування альтернатив мереж при трафіку завантаження файлів та трафіку потокового відео представлено на рис. 8.4-8.5.

Таблиця 8.1. Вхідні дані

Тип мережі	Швидкість передачі даних	Затримка пакетів	Джитер	Частота втрати пакетів	Вартість мережі	Безпечність мережі
WLAN	54	80	15	0.03	20	0.0283
UMTS	7.5	30	10	0.006	45	0.909
WiMAX	25	50	15	0.009	35	0.717

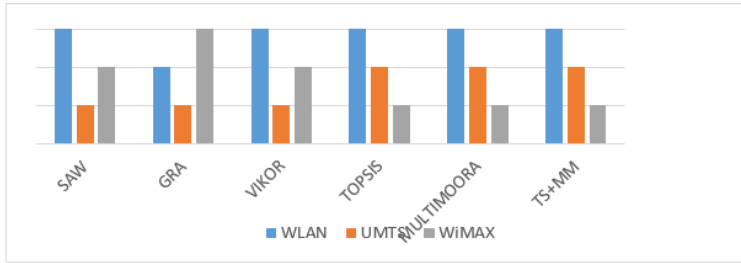


Рис. 8.4. Порівняння ранжування альтернатив мереж при трафіку завантаження файлів

З рис. 8.4 видно, що запропонований підхід у порівнянні з іншими методами прийняття рішень, дає найкращий вибір мережі для трафіку завантаження файлу, на відміну від результатів алгоритмів SAW, GRA і VIKOR, які вибирають UMTS мережу у якості оптимальної, і, таким чином, вибирають не найкращу мережу.

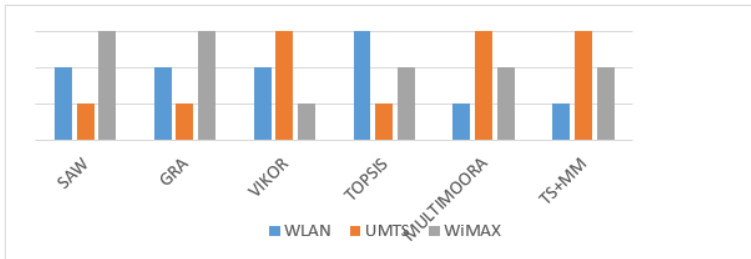


Рис. 8.5. Порівняння ранжування альтернатив мереж при трафіку потокового відео

Як можна побачити з рис. 8.5, алгоритми SAW і GRA вибирають мережу UMTS для потокового відео і однаково для всіх інших типів трафіку, однак, це призведе до погіршення якості зв'язку для трафіку потокового відео на відміну від WLAN, яка була обрана запропонованим модифікованим методом. VIKOR вибирає мережу WiMAX для трафіку потокового відео, яка дасть кращу

продуктивність у швидкості передачі даних, затримки і джитера ніж UMTS, проте гіршу за WLAN.

За результатами моделювання встановлено, що модифікований алгоритм прийняття рішень, який реалізується простіше, ніж MULTIMOORA, забезпечує таку ж ефективність, що й TOPSIS та MULTIMOORA, оскільки у випадку простого одиничного виклику, тобто коли мобільний вузол виконує операцію тільки з одним типом трафіку, хендвер відбувається за допомогою алгоритму TOPSIS. Цей метод має концептуальну простоту і ефективність обчислень з високою швидкістю виконання, а в деяких випадках, переважає над іншими мультикритеріальними алгоритмами прийняття рішень.

8.8. Моделювання математичної моделі алгоритму прийняття рішення для групових викликів

Для середовища моделювання було розглянуто вертикальний хендвер для групових викликів на 1000 мультимодальних терміналів в гетерогенній мережі, який складається з мереж WLAN, UMTS і LTE. Три інтегровані мережі, як передбачається, будуть доступні для всіх викликів. Мобільні вузли підтримують максимум три класи групових викликів: голосовий, завантаження файлів і потокове відео.

Предбачається, що МВ переміщуються по гетерогенній бездротовій мережі з рівномірними прискореннями, збільшуючи швидкість від 0 до 100 км/год від точки А до точки В.

Для сполучених МВ швидкість є важливим динамічним критерієм, який необхідно брати до уваги. Розглядається також п'ять критеріїв важливості: швидкість мобільного вузла, швидкість передачі даних, рівень безпеки, мережева затримка і вартість мережевих послуг для вибору найбільш доцільних мереж для кожної групи викликів.

Деякі функції критеріїв (наприклад, швидкість передачі даних) визначені з використанням дійсних чисел в той час, як деякі інші критерії (наприклад, споживана потужність) визначаються з використанням лінгвістичних термінів. Лінгвістичні терміни визначаються за допомогою трикутника нечітких чисел (TFN), які перетворюються в відповідні ім чіткі числа, як показано в табл. 8.2 [19].

Для кращого аналізу результатів, швидкість мобільного вузла поділяється на три категорії: низька швидкість (0-30 км/год), середня швидкість (0-60 км/год) і висока швидкість (60-100 км/год). Результат виконання хендвера для сценарію потрібного групового виклику з високим значенням важливості трафіку завантаження файлів представлений на рис. 8.6.

Таблиця 8.2. Результуюча матриця критеріїв

Тип мережі	Швидкість мобільного терміналу	Швидкість передачі даних	Безпечність мережі	Затримка мережі	Вартість послуг мережі
WLAN	$Speed_{WLAN}$	54	ML	H	VL
UMTS	$Speed_{UMTS}$	7,5	VH	VL	H

Тип мережі	Швидкість мобільного терміналу	Швидкість передачі даних	Безпечність мережі	Затримка мережі	Вартість послуг мережі
LTE	$Speed_{LTE}$	24	H	L	MH

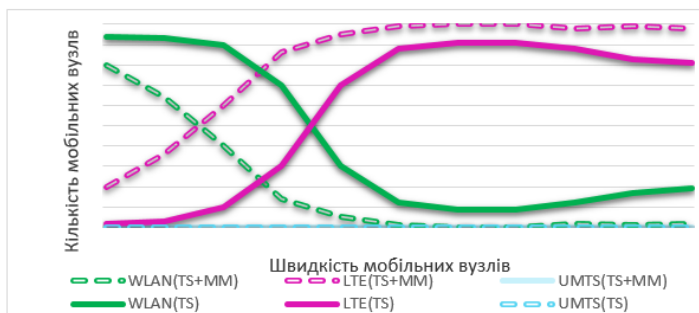


Рис. 8.6. Виконання хендвера при високому значенні важливості трафіку завантаження файлів

Як можна побачити, при низькій та середній швидкості мобільних вузлів (до 40 км/год) обидві схеми віддають перевагу мережі WLAN. При швидкості вище 40 км/год, обидві схеми показали, що LTE стає конкурентоспроможною і кращою альтернативою, ніж WLAN. TOPSIS показує зниження і нестійкий результат переваги для LTE мереж вище області середньої швидкості.

Результат виконання хендвера для сценарію потрібного групового виклику з високим значенням важливості трафіку потокового відео показаний на рис. 8.7.

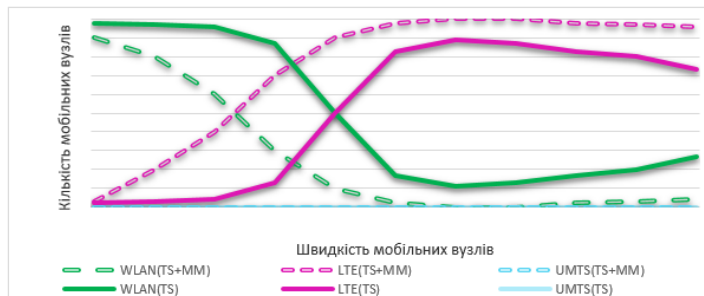


Рис. 8.7. Виконання хендвера при високому значенні важливості трафіку потокового відео

При швидкості мобільного вузла до 18 км/год у разі модифікованого методу та до 35 км/год у разі TOPSIS було обрано мережу WLAN як кращу альтернативу.

Мережа LTE наявно перевершила мережі WLAN і UMTS при роботі на рівні вищому середнього діапазону швидкості для обох схем, проте помітна відносна нестабільність результатів TOPSIS в ділянці високих швидкостей.

Можна побачити, що при низькій швидкості мобільного вузла обидва алгоритми приймають правильне рішення про найбільш відповідну мережу. Проте при збільшенні швидкості мобільного вузла в ділянці підвищеної середньої швидкості результат алгоритму TOPSIS показує відносну нестабільність та зниження ефективності на відміну від запропонованого алгоритму, де результат залишається постійним та стабільним.

Висновки

1. Розглянута модифікація методу вертикального хендвера з метою підвищення якості зв'язку в гетерогенних бездротових мережах за рахунок комбінації двох алгоритмів прийняття рішень, що призводить до збільшення швидкості виконання хендвера при одиночних викликах мобільного вузла та зменшення кількості помилкового перемикавання при групових викликах мобільного вузла.

2. Розглянуто основні методи вертикального хендвера показав, що існуючі рішення не в повній мірі є задовільними відносно критерія хендвера у бездротових гетерогенних мережах з груповими викликами мобільних вузлів.

3. Модифіковано метод вертикального хендвера за рахунок зміни алгоритму прийняття рішень, що дозволило підвищити ефективність зв'язку у гетерогенних бездротових мережах.

4. Запропоновано математичну модель алгоритму прийняття рішення із застосуванням модифікації алгоритмів методів TOPSIS і MULTIMOORA, що підвищило ефективність обробки одиночних та групових викликів.

5. Проведене імітаційне моделювання алгоритму прийняття рішення показало, що при одиночних викликах модифікований метод реалізується простіше ніж MULTIMOORA, забезпечуючи таку саму ефективність, а при групових — демонструє кращі результати, ніж TOPSIS.

6. Запропонований модифікований метод дозволить підвищити якість сервісу вертикального хендвера, особливо з появою гетерогенних мереж з водночас запущеними різними типами трафіку (групові виклики з голосовим, відео трафіком та трафіком завантаження файлів) з мобільних вузлів, які рухаються з високою швидкістю (наприклад автострада, залізниця).

Література

1. HeterogeneousNetworkAdvantages, NEC on Heterogeneous Networks. [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу: http://se.nec.com/en_SE/global/solutions/nsp/lte_sc/hetnet.html?. Дата доступу: 11 січня 2016.

2. 3GPP TR 21.905 V8.4.0 Technical Report 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Vocabulary for 3GPP Specifications (Release 8), Mar. 2008.
3. Pahlavan K. Handoff in hybrid mobile data networks / K. Pahlavan, P. Krishnamurthy, A. Hatami, M. Ylianttila, J. Makela, R. Pichna, J. Vallstron // *Personal Communications*, IEEE 7, no. 2 (2000), P. 34-47.
4. Calvagna G. A user-centric analysis of vertical handovers / G. Calvagna, G. Di Modica // *Proceedings of the Second ACM International Workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN Hotspots – 2004.* – P. 137–146.
5. Siddiqui F. A dynamic network discovery and selection method for heterogeneous wireless networks. / F. Siddiqui, S. Zeadally, H. El-Sayed, N. Chilamkurti. // *International Journal of Internet Protocol Technology.* – 2009. - Vol. 4, no. 2. – P. 99-114.
6. Trestian R. Game Theory – Based Network Selection: Solutions and Challenges / R. Trestian, O. Ormond, G. Muntean // *Member, IEEE / IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS.* – 2012.
7. Saaty T. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, *European Journal of Operational Research.* – 1990. – Vol. 48. – P. 9-26.
8. Protocols, multi-hop mesh/relaying, performance and spectrum coexistence [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу: <http://www.worldcat.org/isbn/0470014393>. Дата доступу: 10 березня 2016.
9. Reddy V. Vertical Handoff Decision using Game Theory Approach for Multi-mode Mobile Terminals in Next Generation Wireless Networks / V. Reddy, R. Reddy // *V International Journal of Computer Applications.* – 2011. – Vol. 36, no. 11. – P. 31-37.
10. Goyal P. A Dynamic Decision Model for Vertical Handoffs across Heterogeneous Wireless Networks / P. Goyal S. K. Saxena //, *World Academy of Science, Engineering and Technology.* – 2008. – Issue 41. – P. 676-682.
11. Savitha R. Vertical Handover decision schemes using SAW and WPM for Network selection in Heterogeneous Wireless Networks *Global Journal of Computer Science and Technology.* – 2011. – Vol. 11, No. 9. – P. 514–521.
12. Lee D. QoS-based vertical handoff decision algorithm in heterogeneous systems. / D. Lee, Y. Han, J. Hwang // *17th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06).* – 2006. – P. 1–5.
13. Alkhwilani M. Multi-criteria Vertical Handover by TOPSIS and fuzzy logic. *International Conference Communications and Information Technology: int. conf.*, 31 March 2011, — Aqaba, 2011.
14. Obayiuwana E. A multimora approach to access network selection process in heterogeneous wireless networks. / E. Obayiuwana, O. Falowoy // *AFRICON2015: int. conf.*, 14-17 Sept. 2015, — Aqaba, 2015.
15. IEEE 802.21 MEDIA INDEPENDENT HANDOVER [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. - Режим доступу: <http://www.ieee802.org/21/>. Дата доступу: 16 квітня 2016.
16. Obayiuwana E. A New Network Selection Algorithm for Group Calls over Heterogeneous Wireless Networks with Dynamic Multi-Criteria / E. Obayiuwana, O. Falowoy // *13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC).* – 2016.

17. An Overview of Vertical Handoff Decision Algorithm in Next Generation Wireless. International Journal of Novel Research in Computer Science and Software Engineering. – 2015. - Vol. 2, Issue 1. -P. 28-35.

18. Мягкая передача вызова и управление мощностью в CDMA [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. - Режим доступу: <http://www.intuit.ru/studies/courses/551/407/lecture/9338%3Fpage%3D6>. Дата доступу: 10 березня 2016.

19. Krichene N. Securing roaming and vertical handover in fourth generation networks / N. Krichene B. Noureddine // International Conference Network and System Security. – 2009. - P. 225-231.

20. Hafezalkotob A. Applied Mathematical Modelling / Arian Hafezalkotob Mohammad Kazem-Sayadi // Volume 40, Issue 2, 15 January 2016, Pages 1372-1386