

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

КОНОПЕЛЬСЬКИЙ Ростислав Ігорович

АЛГОРИТМИ БАГАТОФАКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ / ALGORITHMS OF MULTIFACTOR
OPTIMIZATION OF TELECOMUNICATION NETWORKS

спеціальність; 123 – Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма - Комп'ютерна інженерія

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи Кім-21
Р.І.Конопельський

Науковий керівник:
к.т.н., доцент Л.О.Дубчак

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 2021 р.

Завідувач кафедри КІ
О.М.Березький

Тернопіль - 2021

ВСТУП

Важливим напрямком розвитку комп'ютерних систем є питання розпаралелювання перетворення інформації. В даний час замість суперкомп'ютерів існують багатокомп'ютерні обчислювальні системи, з'єднані між собою високошвидкісними каналами передачі інформації (ВКПІ). Завданнями ВКПІ є не тільки передача даних, пов'язаних з обчислювальним процесом, а й вирішення завдань, характерних для систем зв'язку, зокрема, ВКПІ використовуються для передачі звуку, зображення, групового спілкування (відео та аудіо конференції). Виконання цього класу послуг передбачає використання нових якісних систем передачі на основі спеціалізованих протоколів зв'язку.

Функціональна інтеграція телекомунікацій та комп'ютерних мереж знижує витрати на проектування, конструювання та експлуатацію комп'ютерних систем. Крім того, широке використання в телекомунікаційних мережах цифрового представлення різних видів інформації дозволяє використовувати одні й ті ж канали і пристрої для передачі. Поєднання обох типів мереж також знижує витрати на управління: адміністратор, який використовує одну програму, може одночасно контролювати інший тип передачі даних.

Однак інтеграція телекомунікаційних і комп'ютерних мереж вимагає значного збільшення пропускної здатності та надійності каналів зв'язку. Тому передача звуку і зображення особливо чутливі до втрати пакетів, що визначає додаткові вимоги до надійності каналів зв'язку. Вимоги до затримок передачі, що пред'являються телекомунікаційними та комп'ютерними мережами, дуже суперечливі. Мережі, що підключають обчислювальні пристрої, особливо чутливі до збільшення затримок, і їх значення не повинно перевищувати кількох мілісекунд. У той же час телекомунікаційні мережі не дуже чутливі до затримок і їх значення може досягати сотень мілісекунд.

Важливою стає проблема найбільш доцільного використання виділених інвестицій з урахуванням зміни реальної вартості інвестованих коштів у часі. Ця проблема вимагає розробки методів оптимізації сценаріїв розвитку телекомунікаційних мереж разом у часі та просторі з урахуванням як потреб користувачів, так і особливостей впроваджуваних технологій, оптимізації використання необхідних матеріальних ресурсів. Все це визначає актуальність обраної теми дипломного проекту – багатофакторної оптимізації просторово-часової структури телекомунікаційних мереж.

Метою кваліфікаційної роботи є створення комплексного підходу до практичної реалізації технічної задачі, яка полягає у розробці моделей, методів та алгоритмів багатофакторної оптимізації просторово-часової структури телекомунікаційних мереж за пропускною здатністю та надійністю, а також впровадження програмного забезпечення для планування переходу. підвищення техніко-економічної ефективності телекомунікаційних мереж.

1 АНАЛІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

1.1 Аналіз перспективних напрямів розвитку цифрових телекомунікаційних мереж і систем

Як частина інфраструктури економіки держави телекомунікаційні мережі відіграють надзвичайно важливу роль у житті суспільства та визначають ступінь його розвитку. Збільшення кількості користувачів, поява нових мережевих послуг, еволюція технологій передачі даних, розвиток цифрового зв'язку призвели до природного поступового переходу до цифрових телекомунікаційних мереж і систем.

Аналізуючи тенденції розвитку телекомунікаційних мереж і систем, слід відзначити швидке впровадження окремих цифрових ліній, побудованих за принципом імпульсно-кодової модуляції з використанням мультиплексування з тимчасовим розділенням (TDM) [1-3]. Дослідження показали, що цифрові канали мають набагато меншу ймовірність помилки в порівнянні з аналоговими, а їх продуктивність у 5-7 разів вище аналогових. Цифрові мережі, засновані на цих основних принципах з подальшим мультиплексуванням, називаються плезіохронною цифровою ієрархією (PDH) (рисунок 1.1).

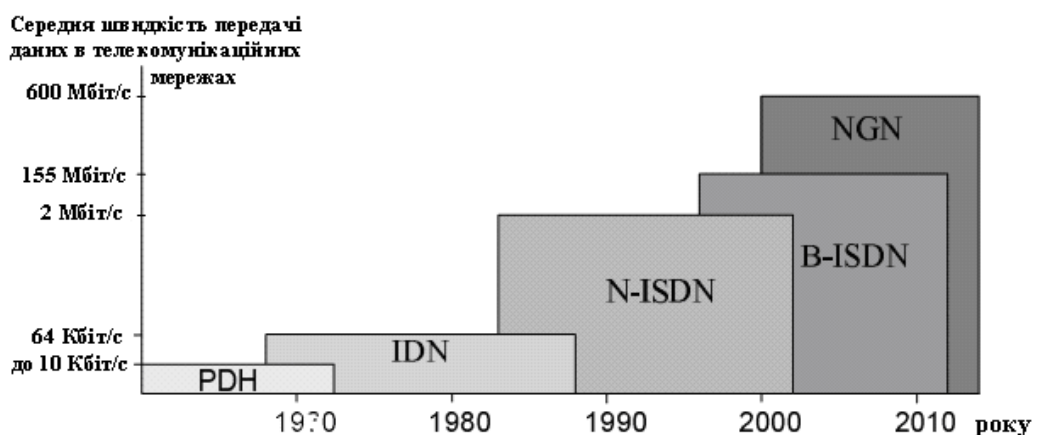


Рисунок 1.1 – Поступовий розвиток цифрових телекомунікаційних мереж

Однак, як показали подальші дослідження принципів побудови та функціонування мереж PDH, обмін інформацією в режимі з комутацією каналів, відсутність автоматизованих протоколів керування мережею та маршрутизації значно ускладнюють процес передачі великих обсягів даних та надання телекомунікаційних послуг з необхідні показники якості [4]. У той же час зростаючий попит і різке підвищення вимог до якості послуг за даними Держкомстату та Київського міжнародного інституту соціології (КМІС, рис. 1.2) викликали необхідність інтеграції різних сервісів у межах єдиної мережі (передача даних, телефонія, відео). та ін.) [5].

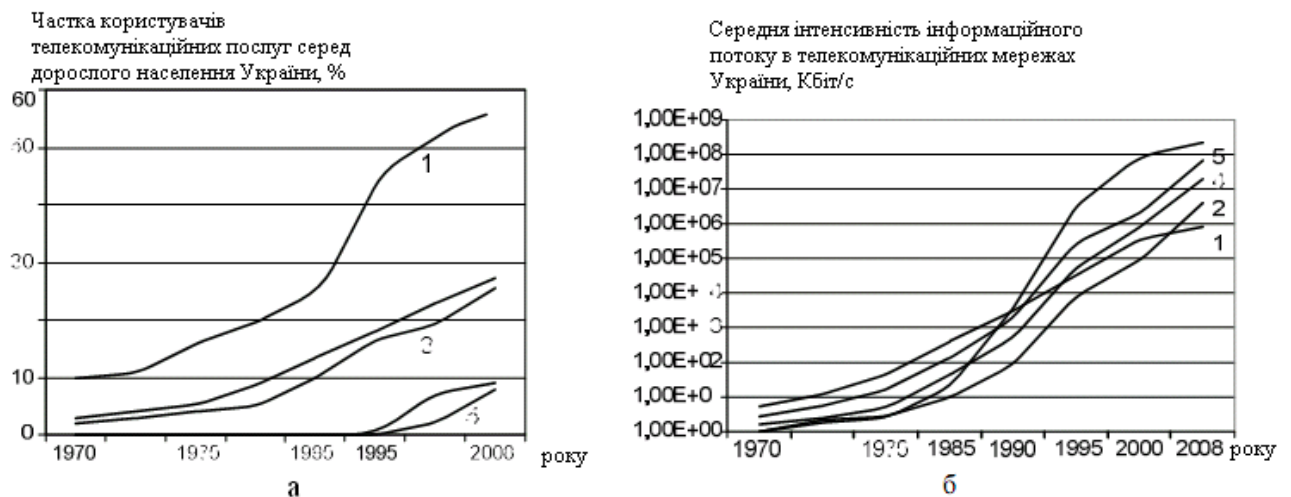


Рисунок 1.2 - Динаміка зростання користувачів телекомунікаційних послуг та середня інтенсивність потоку даних

На рисунку 1.2 введені такі позначення: 1 - телефонія; 2 - IP-телефонія; 3 - надання мультимедійної та відеоінформації; 4 - передача масивів даних; 5 - пошук інформації

Реакцією розробників телекомунікаційних технологій на вимоги інформаційного співтовариства став розвиток цифрових інтегрованих сервісних мереж (ISDN) [2, 5]. Їх реалізація планувалась у три етапи. Перший етап (70 - 80-ті рр.) характеризується переходом до цифрових методів передачі та комутації, т.е.

будується так звана інтегрована цифрова мережа (IDN) для аналогових абонентських ліній і аналогових телефонів. На цьому етапі зберігаються окремі системи передачі даних з комутацією каналів і комутацією пакетів. На другому етапі (80-90-ті роки) Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) розроблено і впроваджено серію рекомендацій I серії з описом основних принципів побудови вузькосмугового CSIO (N-ISDN). Швидкість передачі в такій мережі становить 144 Кбіт/с, яка при початковому доступі до мережі включає два мовних канали 64 Кбіт/с (В-канали) і один канал для даних і службової інформації зі швидкістю 16 Кбіт/с (D-канал).

Дослідження показали, що один такий канал зв'язку обслуговує до 30 «інформаційних каналів» і забезпечує можливість швидкої генерації та скидання дзвінків, а також передачу інформації про вхідні дзвінки, зокрема, номер, до якого звертається в мережу абонента. При побудові мереж N-ISDN використовуються різні методи комутації: комутація каналів (CC) для мови і комутація пакетів (CP) для даних.

Однак на практиці основним режимом роботи ISDN залишається режим з комутацією каналів, що, в свою чергу, унеможлиблює впровадження сучасних засобів і протоколів мережевого (маршрутизації) і транспортного (мультиплексування, сегментація тощо) рівнів у процес передачі даних.

Постійне зростання популярності комп'ютерної техніки в промисловості та приватному секторі (рис. 1.3), збільшення кількості абонентів телекомунікацій, розширення послуг, постійний попит на послуги Інтернету (WWW та ін.) зумовили до значного збільшення загального мережевого трафіку. У зв'язку з цим на наступному етапі розвитку телекомунікаційних мереж відбувся перехід від вузькосмугових інтегрованих сервісних мереж до широкосмугових цифрових мереж (Broadband Integrated Service Digital Network, B-ISDN).

Основні принципи побудови таких мереж, визначені рекомендацією ITU I.121, включають комутацію пакетів, які називаються осередками, та

асинхронний режим доставки (Asynchronous Transfer Mode, ATM) [6]. Базова швидкість передачі даних визначається стандартними рекомендаціями, прийнятими на рівні 155,52 Мбіт/с, що значно вище базової швидкості T-ISDN.

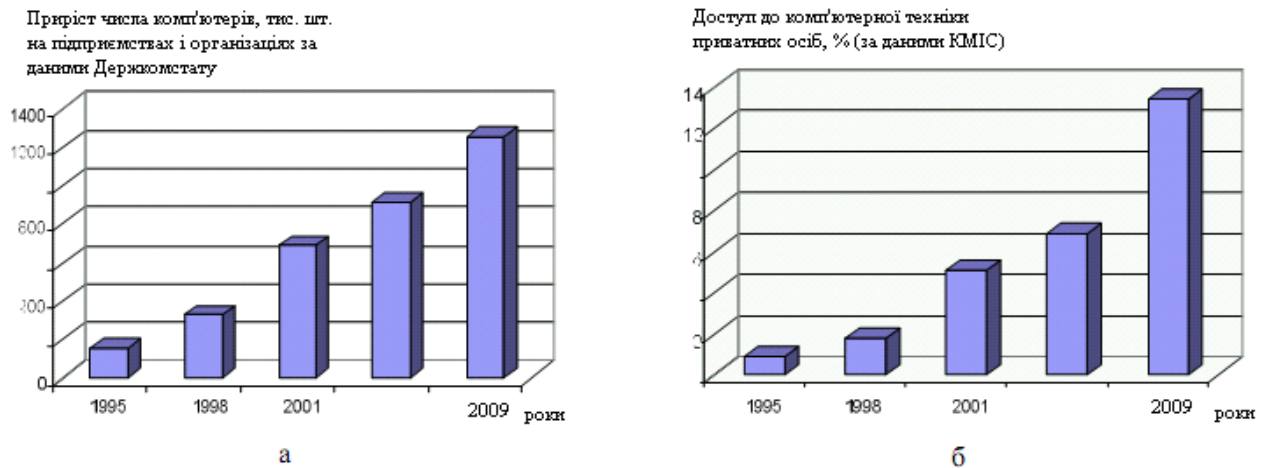


Рисунок 1.3 – Динаміка зростання кількості комп'ютерів на підприємствах і в організаціях та доступу до комп'ютерної техніки населення України

Однак дослідження показали, що поряд з очевидними перевагами даної технології вона має ряд істотних недоліків. Зокрема, складність управління процесами в таких мережах (наприклад, робота банкоматів в режимі з'єднання з доступною швидкістю (ABR)), велика надмірність протоколу ATM, збільшення затримки на складання/розбирання комірок, а також складність протоколів маршрутизації протоколів ", все ще не дозволяють повною мірою використовувати переваги цієї технології для передачі даних в частині отримання множинних запитів від абонентів. У зв'язку з цим практично паралельно з переходом на W-CSIО ІТU була запропонована концепція мультисервісних мереж нового покоління NGN (Next Generation Network).

Поняття NGN, перш за все, характеризується чітким розмежуванням трьох рівнів зв'язку – доступу, транспорту та послуг (рис. 1.4) відповідно до їх

функціональні завдання (для маршрутизації, комутації та передачі даних використовується транспортний функціональний рівень, для сигналізації інформації – рівень доступу, а логіка управління сервісами та додатками, створення, впровадження та взаємодія різних сервісів відповідає рівню сервісу) [7].]

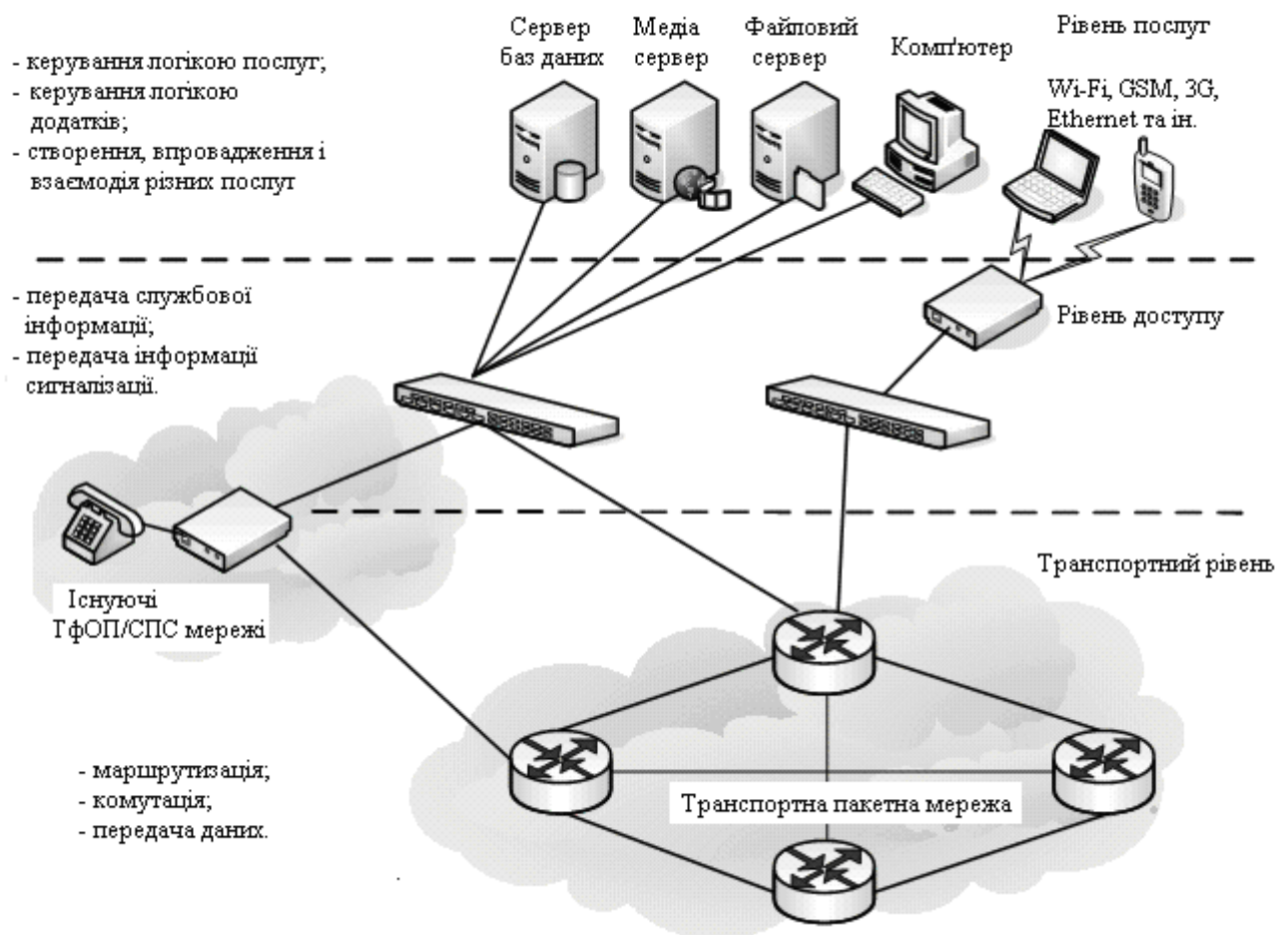


Рисунок 1.4 – Узагальнена схема побудови мережі NGN

Основною відмінністю мереж NGN від B-ISDN є відмова від «парадигми каналів», прийнятої в традиційних мережах, і перенесення традиційних (телефонія, відео тощо) послуг на платформу IP. Аналіз показав, що використання стеку TCP/IP на транспортному рівні мережі NGN спростить процес управління та маршрутизації потоків даних. Порівняльний опис

можливостей надання різноманітних телекомунікаційних послуг цифровими мережами наведено в таблиці 1.1.

Метою NGN є забезпечення всіх елементів, необхідних для можливої сумісності та здатності мережі забезпечити глобальну підтримку програмних додатків у телекомунікаційній мережі.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика можливостей надання різних телекомунікаційних послуг цифровими мережами

Телекомунікації послуги	Тип телекомунікаційної мережі				
	PDH	IDN	N-ISDN	B-ISDN	NGN
Телефонія	+	+	+	+	+
IP-телефонія	-	-	-	+	+
Відеоконференція, відеоспостереження	-	-	-	+	+
Передача оф інформації	-	+	+	+	+
Висока швидкість передачі даних	-	-	-	+	+
Короткостроковий обмін даними (дистанційне навчання тощо)	-	-	+	+	+
Пошук інформації	-	-	+	+	+

Основні характеристики NGN:

- передача з комутацією пакетів;
- поділ функцій управління між смугою пропускання несучого каналу, сеансу виклику, а також програм-сервісів;

- рішення між наданням послуг і транспортуванням інформації та наданням відкритих інтерфейсів;

- підтримка широкого спектру сервісів, додатків та механізмів на базі уніфікованих сервісних одиниць (включаючи сервіси реального часу в режимі потокового, автономного режиму та мультимедійні послуги);

- можливості широкосмугової передачі з функцією наскрізної якості обслуговування (QOS);

- взаємодія з існуючими мережами через відкриті інтерфейси;

- універсальна мобільність, тобто можливість для користувача або інших рухомих об'єктів спілкуватися та отримувати доступ до послуг незалежно від зміни місця розташування чи специфікацій. Ступінь доступності послуги може залежати від ряду факторів, включаючи можливість доступу до мережі згідно з угодою про рівень обслуговування між домашньою мережею користувача та транспортною мережею тощо. Мобільність допускає можливість надання телекомунікацій як у поєднанні з безперервним наданням послуг, так і без такої можливості;

- необмежений доступ користувачів до різних постачальників послуг;

- різноманітність схем ідентифікації;

- єдині характеристики обслуговування;

- конвергенція послуг фіксованого та мобільного зв'язку;

- незалежність сервісних функцій від використовуваних транспортних технологій;

- виконання всіх регламентованих вимог, зокрема щодо екстреного зв'язку захисту інформації.

У NGN функціональні об'єкти, які забезпечують структуру, сеанси зв'язку, середовище передачі, ресурси, надання послуг, захист тощо, можуть бути розподілені по інфраструктурі існуючих і нових мереж. Коли вони просторово розділені, вони повинні спілкуватися через відкриті інтерфейси. Тому важливим моментом для NGN є визначення опорних точок. Протоколи необхідно

стандартизувати, щоб забезпечити зв'язок між взаємодіючими функціональними об'єктами. Взаємодія між NGN різних операторів і між мережами, такими як комутована телефонна мережа загального користування, цифрова мережа з інтегрованими послугами та глобальна система мобільного зв'язку, забезпечується за допомогою шлюзів.

NGN підтримує як існуючі, так і передові периферійні пристрої, включаючи аналогові телефони, факсимільні апарати, обладнання для прийому та передачі даних, кабельні модеми, стільникові мобільні телефони, периферійні пристрої для систем загального радіодоступу, персональні комп'ютери, цифрові центри тощо.

Модель архітектури мережевого управління повинна враховувати різні вимоги до функцій управління та визначати типові команди, які діють в опорних точках. Нижче наведено приклади груп функцій:

- функції шлюзу для доступу до середовища передачі, мережевого пристрою для захисту мережі адресного порту (NAPT), посилення стратегії передачі;
- управління ресурсами, включаючи контроль та обробку запитів на доступ;
- управління сеансами доступу, включаючи розподіл адрес, місцезнаходження користувача, управління профілем доступу користувача;
- управління послугами, включаючи реєстрацію користувачів, керування профілем служби користувача, обробку запитів на обслуговування, управління взаємодією з сервісом.

Моделі архітектури мережевого управління повинні враховувати функціональні вимоги доступу до мережі (інтерфейс користувача-мережі), інтерфейсів між мережами (інтерфейс мережа-мережа) та інтерфейсів між мережами та постачальниками послуг/додатків (наприклад, мережа-мережа). - інтерфейси постачальника).

Аналіз переваг та недоліків цифрових телекомунікаційних мереж показав перспективи розвитку широкосмугових мереж (B-ISDN, NGN). Однак, враховуючи значне збільшення кількості абонентів та інтенсивності наданого трафіку, а також розширення послуг і постійне збільшення вимог імовірності часу до якості обслуговування (Quality of Service, QOS) (особливо за часом доставки даних та їх надійності) перед операторами телекомунікаційних послуг, крім традиційних завдань збільшення пропускної здатності мережі, постає завдання оптимізації розподілу потоків даних для повного використання наявних ресурсів. Сьогодні очевидно, що характеристики обслуговування потоків даних слід диференціювати залежно від характеру трафіку, перевантаженості окремих компонентів телекомунікаційної мережі, зміни інтенсивності інформаційних потоків, а також з урахуванням імовірнісних і тимчасових вимог до якості послуги.

1.2 Моделі управління трафіком з аналізом інтенсивності телекомунікаційної мережі

Вирішення проблем якості обслуговування (Quality of Service QOS) в сучасних і передових телекомунікаційних технологіях нерозривно пов'язане з ефективністю засобів управління мережевими ресурсами і, зокрема, засобів управління трафіком. Важливо зазначити, що управління трафіком може здійснюватися як у межах транспортної телекомунікаційної мережі (ТКС), так і на рівні доступу до неї [8]. Як правило, на рівні транспортної мережі управління трафіком відбувається її маршрутизація, управління чергою, а на рівні доступу в її згладжування та обмеження інтенсивності у разі порушення угоди про рівень обслуговування (Service Level Agreement (SLA)) [9]. Для отримання бажаних

значень показників якості обслуговування при мінімальному використанні мережі (буфера,

Сучасні телекомунікації зосереджені на проблемах, пов'язаних з передачею великої кількості інформації на великі відстані без шкоди для втрат через шум і перешкоди. Основні компоненти сучасної цифрової телекомунікаційної системи повинні мати можливість передавати голос, дані, радіо- та телевізійні сигнали. Цифрова передача Використовується для досягнення високої надійності і через вартість цифрових систем, яка значно нижча за собівартість аналогічної системи. Однак для цифрової передачі використовують аналогові сигнали, які складають більшість голосу, радіо і телебачення іспілкування, повинні бути піддані процесу аналого-цифрового перетворення. У багатьох випадках оцифрований сигнал пропускається через вихідний кодер, який використовує низку формул скорочення додатковою двійковою інформацією. Після кодування джерела оцифрований сигнал обробляється в каналному кодері, який вводить надлишкову інформацію, що дозволяє виявляти і виправляти помилки. Закодований сигнал придатний для передачі модуляції несучі хвилі і може стати частиною більшого сигналу в процесі, відомому як мультиплексування. Потім мультиплексований сигнал передається в канал передачі з множинним доступом. Після передачі вищезазначений процес відбувається на стороні отримувачі, і інформація витягується.

Найпростіший можливий сигнал будь-якого типу, який можна використовувати для передачі повідомлень, двійковий сигнал складається лише з двох можливих значень. Ці значення представлені двійковими цифрами або біт добре, 1 і 0. Якщо шум і спотворення, виявлені під час передачі, недостатньо великі, щоб змінити двійковий сигнал з одного значення на інше, правильне значення можна визначити за допомогою приймачі.

Якщо інформація для передачі вже була подана до бінарної форми, немає необхідності в цифровому кодуванні сигналу. Але звичайний телефонний

голосовий зв'язок не має двійкової форми; більшість інформації не збирається для передачі з космічного зонда, а телевізійні або радіосигнали не збираються для передачі через супутник. Такі сигнали, які постійно змінюються в діапазоні значень, називають аналоговими, а в системах цифрового зв'язку аналогові сигнали необхідно перетворювати в цифрову форму. Процес такого перетворення сигналу називається аналого-цифровим перетворенням (АЦП).

Аналого-цифрове перетворення починається з вибірки або вимірювання амплітуди аналогаформи хвилі однаково віддалені дискретні моменти часу. Той факт, що зразки хвилі, що постійно змінюється, можуть бути використані для представлення цієї хвилі, заснований на припущенні, що хвиля обмежена в швидкості зміни. Оскільки сигнал зв'язку насправді є складною хвилею - по суті сумою ряду компонентів синусоїди, кожна з яких має свої точні амплітуди і фази, - швидкість зміни складної хвилі може бути виміряна частотами коливань усіх її компонентів. Різниця між максимальною швидкістю коливань (або найвищою частотою) та мінімальною швидкістю коливань (або найнижчою частотою) синусоїдальних хвиль, які утворюють сигнал, відома як потужність сигналу. Таким чином, пропускна здатність максимальна частоті і діапазон, який займає сигнал. У разі голосового сигналу з мінімальною частотою 300 Гц і максимальною частотою 3300 Гц смуга пропускання становить 3000 Гц або 3 кГц. Аудіосигнали зазвичай займають близько 20 кГц смуги пропускання, а стандартні відеосигнали займають близько 6 мільйонів герц або 6 мегагерц.

Концепція пропускної здатності є центральною для всіх телекомунікацій. У аналого-цифровому перетворенні існує фундаментальна теорема про те, що аналоговий сигнал може бути однозначно представлений дискретними вибірками, розташованими не більше ніж один на подвійну пропускну здатність.

Для того, щоб сигнал вибірки був збережений або переданий у цифровій формі, кожна амплітуда вибірки повинна бути перетворена в одне з можливих значень або рівнів. Для зручності перетворення в двійковий, кількість рівнів зазвичай становить 2 ступінь, тобто 8, 16, 32, 64, 128, 256 і так далі, залежно від

необхідного ступеня точності. Цифрова передача голосу зазвичай використовує 256 рівнів, оскільки тести показали, що вона забезпечує достатню точність для звичайного слухача телефону.

Вхідним сигналом для квантувальника є послідовність амплітуд вибірки, для яких він існує нескінченній кількості можливих значень. З іншого боку, вихід квантувальника повинен бути обмежений кінцевою кількістю рівнів. Призначення нескінченно змінних амплітуд обмеженій кількості рівнів неминуче вносить неточність, а неточність призводить до відповідного спотворення сигналу. Ступінь неточності залежить від кількості вихідних рівнів, які використовує квантувальник. Більше рівнів квантування підвищує точність представлення, але вони також збільшують необхідну ємність зберігання або швидкість передачі. Кращої продуктивності з однаковою кількістю вихідних рівнів можна досягти за розумного розміщення вихідних рівнів і амплітудипорогинеобхідні для призначення цих рівнів. Це розташування, у свою чергу, залежить від природи сигналу, що квантується. Як правило, оптимальний квантувальник розміщує більше рівнів у діапазонах амплітуд, де ймовірність появи сигналу є більшою, і менше рівнів, де сигнал є менш імовірним. Ця техніка відома як нелінійне квантування. Нелінійне квантування також може бути виконано шляхом пропускання сигналу через ланцюг компресора, який посилює слабкі компоненти сигналу іслабшаєйого сильні компоненти. Стиснутий сигнал тепер вузькийдинамічнийдіапазон, може бути квантований рівномірним або лінійним інтервалом між порогами та вихідними рівнями. У разі телефонного сигналу стиснутий сигнал рівномірно квантується на 256 рівнях, кожен рівень представлений послідовністю з восьми бітів. На приймальному кінці відновлений сигнал розширюється до початкового діапазону амплітуд. Ця послідовність стиснення та розширення, відома як пакетне, може забезпечити ефективний динамічний діапазон, еквівалентний 13 бітам.

На наступному етапі процесу оцифрування вихідний сигнал квантувальника відображається в двійковій послідовності. ДекодуєТаблиця, яка

може бути використана для створення двійкової послідовності, виглядає так: Очевидно, для 8 рівнів потрібні три двійкові цифри або біти; 16 рівнів вимагають чотири біти; і 256 рівнів вимагають вісім бітів. Загалом для 2^n рівнів потрібні 2 біти.

У випадку 256-рівневого квантування голосу, де кожен рівень представлений послідовністю з 8 біт, загальна швидкість передачі становить 8 000 вибірок в секунду, помножена на 8 біт на вибірку, або 64 000 біт в секунду. Усі 8 біт мають бути передані до появи наступного зразка. Щоб використовувати більше рівнів, більше двійкових вибірок потрібно було б втиснути у відведений інтервал часу між послідовними вибірками сигналу. Схема стане дорожчою, а пропускна здатність системи буде відповідно вище. Якась передачаканалах (одним із прикладів є телефонні дроти) може не мати пропускної здатності, необхідної для збільшення кількості двійкових вибірок, і спотворюватиме цифрові сигнали. Таким чином, хоча необхідна точність визначає кількість використовуваних рівнів квантування, отримана двійкова послідовність все одно повинна передаватися в межах допустимої смуги пропускання.

Незважаючи на досить широкий спектр використовуваних нині мережевих механізмів і протоколів, узгодженого вирішення проблем управління приватним трафіком не передбачено. Існуючі засоби управління трафіком, які відповідають за його формування, розподіл (маршрутизацію) та обмеження, розподіляються на основі інформації про середню швидкість мережевих пакетів, заявленої в угоді QOS, топології мережі [10]. Для вирішення кожної із завдань контролю використовуються окремі засоби, наприклад, для генерації трафіку використовуються механізми Traffic Shaping і Committed Access Rate, протоколи IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), OSPF (Open Shortest Path First), PNNI (Private Network). використовуються для вирішення маршрутних завдань. - до - мережевий інтерфейс) [10] та інші. Ці інструменти працюють послідовно, визначення один для одного вихідних даних при вирішенні задач управління рухом. Крім того, по суті, евристичні моделі управління трафіком призначені для

пошуку найкоротшого шляху в мережі кошика маркерів і не здатні врахувати зміни поточного навантаження вузла мережі та характеристик трафіку інших користувачів. Це, у свою чергу, значно зменшує функціональність елементів керування та значно обмежує їх область застосування в TCS. Таким чином, причиною низького рівня узгодженості розв'язання завдань управління рухом є не стільки проблема технологічної реалізації цієї вимоги, скільки складність формалізації цих завдань у рамках єдиної моделі. Щодо цього,

У [11] запропоновано розробку математичної моделі багатошляхової маршрутизації в напрямку узгодження отриманих рішень із задачами адаптивного обмеження інтенсивності трафіку, що надходить у ТКС. У цій моделі структура мережі описується графіком $G = (M, E)$, де M — набір вузлів, а E — набір шляхів передачі в мережі. Для кожної дуги $(i, j) \in E$ його пропускна здатність є характерною ϕ_{ij} , і кожен трафік із множини K пов'язаний з низкою параметрів: r_k, s_k, d_k - інтенсивність k -го трафіку, вузол-джерело та вузол-одержувач відповідно. Керуючою змінною в межах обраної моделі є значення x_{ij}^k , що характеризує долю k -го руху, що протікає в урочищі (i, j) . Крім відомих моделей маршрутизації [7-9], також вводиться значення a^k (формула (1.1)), яка моделює частку k -го трафіку, якому було відмовлено в обслуговуванні мережею. Тоді вектор шуканих параметрів зручно представити у вигляді:

$$X = \left[\begin{array}{c} x_{ij}^k \\ a^k \end{array} \right], \quad (1.1)$$

де $(i, j) \in E, k \in K$.

Розмірність вектора X визначається добутком числа в мережі шляхів даних на кількість проаналізованого користувачького трафіку. При обчисленні вектора

Х за формулою (1.1) необхідно мінімізувати деяку функцію вартості $\min_x c' X$, що характеризує відносну вартість управління трафіком на етапі доступу до мережі та TCS, а координати вектора c (формула (1.2)) у свою чергу визначають розмір штрафу за перевантаження шляхів передачі TCS (c_{ij}^k) та щодо обмежень у службі трафіку користувачів (c^k).

$$c = \begin{bmatrix} c_{ij}^k \\ c^k \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Розмірність вектора формули (1.2) повністю збігається з розмірністю шуканого вектора X (формула (1.1)). Щоб запобігти втраті пакетів на вузлах мережі та в мережі в цілому під час обчислення вектора X , необхідно забезпечити виконання умови збереження потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0 \text{ при } k \in K, i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 1 - a^k \text{ при } k \in K, i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = a^k - 1 \text{ при } k \in K, i = d_k. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Також необхідно забезпечити умови для запобігання перевантаженню шляхів передачі TCS $\sum_{k \in K} r_k x_{ij}^k \leq \varphi_{ij}, (i, j) \in E$.

За формулами (1.1) - (1.3) у загальному випадку за координатами a^k вектора X накладаються такі обмеження: $0 \leq a^k \leq 1$, або $a^k \in 0,1$, якщо дозволено угоду про рівень обслуговування (SLA). $0 \leq a^k \leq 1$ або не дозволено $a^k \in 0,1$ часткове обмеження швидкості доступу до мережі.

Важливою вимогою до рішень, отриманих під час використання наведених вище моделей (формул (1.1) - (1.3)), є забезпечення адаптивного характеру обмеження трафіку, що надходить у мережу. У разі перевантаження мережі спочатку слід обмежити трафік з низьким пріоритетом, а потім – трафік, який є джерелом перевантаження TCS.

Крім того, процес адаптивного обмеження трафіку має бути превентивним, тобто інтенсивність трафіку, що надходить у мережу, має бути обмежена не після перевантаження мережі, а завчасно, запобігаючи таким чином виникненню перевантажень глобального характеру. Отже, в рамках цієї моделі (формули (1.1) - (1.3)) визначається вплив окремих мережевих (структурних і функціональних) параметрів на кількість і характер можливих зон обмеження руху з обґрунтуванням вибору значень досліджено певні параметри моделі. Це, перш за все, як показують приклади, розглянуті в [10], стосується вибору числових значень і співвідношення ваг (формула (1.3)) у цільовій функції (формула (1.2)), які відповідають за штраф за використання шляхів передачі або можливі збої.

Загалом, в середньому потрібно менше бітів, якщо вихідний кодер враховує ймовірності, при яких можуть відбуватися різні рівні квантування. Простий приклад проілюструє цю концепцію. Припустимо, що шкала квантування складається лише з чотирьох рівнів: 1, 2, 3 і 4. Відповідно до звичайного стандарту двійкового кодування, кожен із чотирьох рівнів буде представлений двобітовим кодовим словом. Але також припустимо, що рівень 1 зустрічається 50 відсотків часу, рівень 2 - 25 відсотків часу, а рівні 3 і 4 - 12,5 відсотків часу. Використання кодових слів зі змінними бітами може привести до більш ефективного відображення цих рівнів. Правило кодування змінних бітів

використовує лише один біт у 50% випадків, два біти в 25% випадків і три біти в 25% випадків. У середньому він використовує 1.

Таким чином, для будь-якого заданого набору рівнів і пов'язаних з ними ймовірностей існує оптимальне правило кодування, яке мінімізує кількість бітів, необхідних для представлення джерела. Це правило кодування відоме як код Хаффмана на честь американського вченого, який створив його в 1952 році. Ще більш ефективно кодування можливо, якщо згрупувати послідовності рівнів разом і застосувати до цих послідовностей код Хаффмана.

Розробка та продуктивність коду Хаффмана залежить від знання розробниками ймовірностей різних рівнів і послідовностей рівнів. У багатьох випадках, однак, бажано мати систему кодування, яка може адаптуватися до невідомих ймовірностей джерела. У 1970-х роках ізраїльтяни розробили дуже ефективну техніку кодування джерел без необхідності знати їх ймовірності. Лемпель-Зівалгоритм працює шляхом створення кодової книги з послідовностей, які мали місце раніше. Наприклад, кодова книга може починатися з набору з чотирьох 12-бітових кодових слів, що представляють чотири можливі рівні сигналу. Якщо два з цих рівнів надійшли послідовно, кодер замість того, щоб передати два повних кодових слова (довжина 24), передає би кодове слово для першого рівня (12 біт), а потім два додаткові біти для вказівки другого рівня. Потім кодер створить нове 12-бітове кодове слово для дворівневої послідовності, а потім використає ще менше бітів для представлення цієї конкретної комбінації рівнів. Кодер продовжує зчитувати рівні квантування, поки не прибуде інша послідовність, для якої не було кодового слова. У цьому випадку в кодовій книзі буде послідовність без останнього рівня, але не вся послідовність рівнів. знову кодер передасть кодове слово для початкової послідовності рівнів, а потім додаткові два біти для останнього рівня. Процес триває до тих пір, поки всі 4096 можливих 12-бітових комбінацій не будуть призначені як кодові слова.

На практиці стандартно алгоритм використовуйте 12-розрядні кодові слова для стиснення двійкових файлів і передайте 1 додатковий біт, щоб

позначити нову послідовність. Використовуючи такий код, алгоритм Лемпеля-Зіва може стиснути передачу англійського тексту приблизно на 55 відсотків, тоді як код Хаффмана стискає передачу лише на 43 відсотки.

1.3 Формування вимог і постановка проблеми

За останні роки стрімко розвивається процес розвитку телекомунікаційних мереж (ТМ), тоді як загальна ситуація в сфері інфокомунікацій значно змінилася внаслідок переходу від індустріального суспільства до інформаційного. Водночас змінилися загальні підходи до створення та розвитку телекомунікаційних мереж. Це пов'язано з низкою причин, основними з яких є конкуренція на ринку інфокомунікаційних послуг (ІКП) та темпи появи нових технологій у телекомунікаціях, які постійно збільшуються. Швидке зростання ТМ пояснюється не тільки зростаючою потребою в різноманітних ІКП, кількість яких також постійно збільшується, а й безпрецедентними темпами зміни мережевих технологій. Якщо раніше нові покоління систем комутації та передачі з'являлися на ТМ кожні кілька десятиліть, то зараз зміна технологій відбувається набагато швидше. У той же час нові технології мають значний вплив на структуру модернізованої мережі. У зв'язку з цим загальні підходи до планування ТМ потребують істотних змін у деяких аспектах.

На перший план виходить ретельна проробка рішень, прийнятих під час середньо- та довгострокового планування, оскільки помилки в плануванні ТМ не лише призводять до значно більших фінансових втрат, ніж десять років тому, а й, не в останню чергу, їх наслідки значно ускладнюються. виправити.

Тому основним завданням даного дипломного проекту є оптимізація сценаріїв розвитку ТМ, що тісно пов'язане з основними напрямками розвитку телекомунікацій в Україні.

Метою даної роботи є створення комплексного підходу до розробки моделей, методів та алгоритмів багатofакторної оптимізації просторово-часової структури ТМ за критерієм мінімальних поточних витрат та реалізації програмного планування мереж у перехідний період, що покращує технічне та економічна ефективність ТМ.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- вибір та обґрунтування методу порівняння альтернатив для вирішення задачі оптимізації модернізації ТМ;
- постановка проблеми оптимізації модернізації ТМ;
- визначення та аналіз найбільш значущих факторів, що впливають на структуру мережі під час модернізації, з урахуванням їх можливої кореляції та оцінка ступеня чутливості характеристик ТМ до варіацій кожного фактора;
- розробка математичних моделей, які адекватно описують зміни вимог користувачів до підключення до мережі та підтримання цих вимог мережею;
- формалізація опису модернізації ТМ разом у часі та просторі;
- розробка стійкої математичної моделі оптимізації просторово-часової структури розвитку ТМ та отримання математичних залежностей, які адекватно описують функцію вартості розвитку мережі;
- формулювання загальної задачі оптимізації ТМ за критерієм мінімального значення поточних витрат;
- розробка алгоритмічної процедури вирішення задачі модернізації ТМ;
- програмна реалізація алгоритмічної процедури оптимізації ТМ.

2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1 Структура оптимального сценарію розвитку мережі

З метою покращення параметрів сучасних телекомунікаційних систем доцільно зменшити кількість рівнів ієрархічної структури. З одного боку, їх кількість має враховувати суперечливі вимоги щодо зменшення затримок даних, а з іншого боку, спрощення процедур проектування та експлуатації мережі. Щоб мінімізувати затримки, зберігаючи зональну архітектуру, мережа повинна складатися з трьох рівнів: базової мережі, мережі доступу та визначеного користувачем рівня [12]. Мережа доступу (MD) об'єднує інформацію, яка передається між вузлами користувача. З'єднання між MD і базовою мережею (NM) може бути як одиничним (для недорогих мереж), так і множинним (для високошвидкісних мереж). MD, як правило, формується на основі використання таких топологій, як дерево, зірка тощо. Другий елемент високошвидкісних мереж зв'язку NM об'єднує трафік, що передається між елементами, підключеними до мереж доступу. Для його реалізації найчастіше використовуються такі топологічні організації, як: повнозв'язні мережі, зірка, кільце тощо. Надалі для позначення топологічної організації мережі зв'язку будемо використовувати тип запису топологія мережі доступу / топологія ядра мережі. Наприклад, дерево записів / повністю підключена мережа означає, що MD заснований на топології дерева, а NM заснований на повністю підключеній мережі (Малюнок 2.1). Мережа, показана на малюнку 2.1, має ієрархічну організацію. Верхній рівень утворює ядро мережі. У цьому випадку це повноцінна мережа. Нижній рівень MD реалізується у вигляді деревоподібної структури. Переваги використання NM включають:

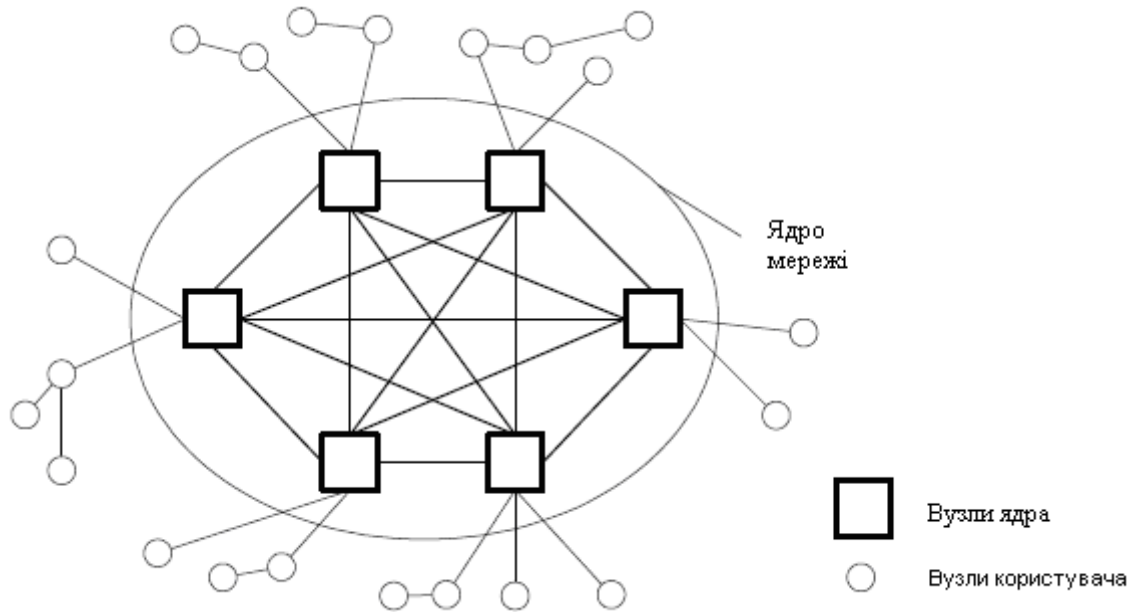


Рисунок 2.1 - Топологічна організація типу дерева/повністю підключеної мережі

Альтернативною архітектурою є мережа, в якій NM замінено центральним вузлом. У мережі з такою організацією питання проектування та управління значно спрощуються. Однак вимоги до центрального вузла надзвичайно високі. Приклад мережі з такою організацією представлений на рисунку 2.2.

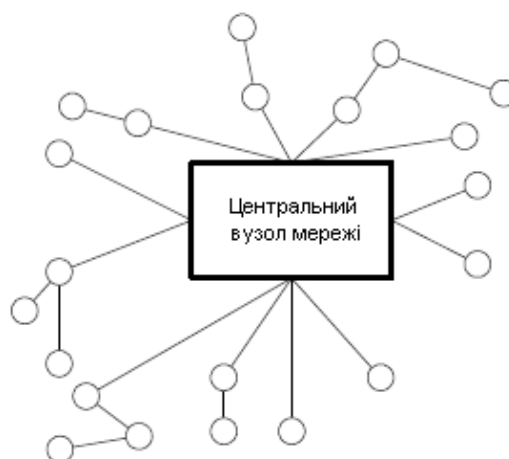


Рисунок 2.2 – Топологічна організація типу дерева/центрального вузла

Організація мереж високошвидкісного зв'язку з використанням трирівневої архітектури призводить до значного підвищення ефективності передачі потоків повідомлень. Однак отриманих результатів часто недостатньо для ефективної передачі гіпертекстової інформації. Тому при створенні високошвидкісних каналів передачі необхідно використовувати можливості нових фізичних середовищ передачі.

Значний інтерес представляє побудова гібридних мереж, в яких НМ виконується у вигляді багатоканальної оптичної мережі, а МД на основі класичного середовища на основі електричних сигналів. Гібридна комунікаційна архітектура особливо корисна в мережах НМ у вигляді повністю підключеної або звичайної мережі. Процес проектування топології відіграє особливу роль.

У процесі проектування комунікаційної системи слід враховувати такі фактори, як:

1) допустима кількість вузлів, що утворюють НМ. У конкретному випадку може використовуватися тільки один центральний вузол;

2) обмеження щодо розташування вузлів НМ. У реальній мережі локалізація вузлів не є довільною, їх розташування обмежене комерційними причинами, правами власності, технічними умовами тощо;

3) продуктивність/вартість деяких вузлів мережі;

4) спосіб підключення користувачів до НМ. Вузли користувача групуються в зв'язану структуру за допомогою МД і з'єднуються з НМ двоточковим каналом зв'язку. Це знижує вартість обладнання ЯМ, але в той же час підвищує вимоги до каналів передачі, знижує надійність зв'язку. З іншого боку, мінімізація розміру груп користувачів (збільшуючи тим самим їх кількість) призводить до збільшення кількості НМ-портів, одночасно зменшуючи вимоги до пропускної здатності каналів.

Проектування комунікаційної архітектури комп'ютерної мережі зазвичай є ітераційним процесом. Його першим кроком є визначення кількості вузлів НМ та їх розташування та ідентифікація вузлів користувача з конкретними вузлами

MD. Другий крок пов'язаний з проектуванням MD, третій з визначенням архітектури NM. Ітераційні методи засновані на припущенні, що всі три задачі проектування можуть бути вирішені незалежно.

Окремою проблемою є вибір цільової функції. Найчастіше метою проектування вважають або створення мережі з мінімальними витратами, або створення мережі з мінімальними затримками в передачі інформації [13].

Функціональна модель мережі може бути представлена трьома рівнями (додаток А):

- транспортний рівень;
- рівень контролю комутації та передачі інформації;
- рівень управління обслуговуванням.

Завданням транспортного рівня є комутація та прозора передача інформації користувача.

Завданням рівня управління комутацією та передачею є обробка тривожної інформації, маршрутизація виклику та керування потоком.

Рівень керування послугами включає програмне забезпечення та програмне забезпечення для керування логікою послуг і є розподіленим обчислювальним середовищем, яке забезпечує такі потреби:

- надання інфокомунікаційних послуг;
- управління послугами;
- створення та впровадження нових сервісів;
- взаємодія різних служб.

Рівень управління сервісом дозволяє реалізувати специфіку послуг і застосувати одну і ту ж програму логіки обслуговування, незалежно від типу транспортної мережі (IP, ATM, FR тощо) та способу доступу. Наявність цього рівня також дозволяє вводити будь-які нові послуги в мережі, не заважаючи роботі інших рівнів.

Цей рівень може включати безліч незалежних підсистем («мережевих послуг»), заснованих на різних технологіях, які мають власних абонентів і використовують внутрішні системи адресації.

2.2 Розробка математичних моделей багатокритеріальної оптимізації телекомунікаційних мереж

У процесі створення та вдосконалення телекомунікаційної мережі вирішуються дві нерозривно пов'язані завдання: планування мережі та оптимізація мережі (перепланування за наслідками експлуатації з метою підвищення ефективності мережі) [13].

Планування телекомунікаційної мережі (ТМ) включає три основні етапи:

- попереднє планування;
- детальне планування;
- планування стільникової транспортної мережі (передачі).

Попереднє планування мережі пов'язане з вибором стратегії побудови мережі, покриття, пропускної здатності, параметрів якості зв'язку. Крім того, на етапі попереднього планування оцінюють схему розташування мережі та передбачають розміщення елементів мережі. В результаті цього етапу має бути представлений початковий детальний план впровадження мережі.

Детальне планування мережі здійснюється на основі даних, отриманих на етапі попереднього планування. При детальному плануванні виконуються такі операції: комп'ютерне проектування мережі для створення необхідного покриття території; аналіз перешкод (канальний, зовнішній, шумовий); частотне планування; документація тощо. Цей етап включає планування мережі та системи комутації мережі.

При плануванні мережі необхідно визначити тип і точне розташування

базових станцій, тип і розташування систем, розрахунок зон покриття і меж базових станцій з урахуванням даних про абонентський трафік, а також скласти детальний план мережі. включаючи результати попереднього абзацу. і тестування території.

У процесі планування системи комутації мережі (SNP - Switching Network Planning) оцінюється обсяг комутації; рівень виконання мережі встановлюється відповідно до заданої комутаційної здатності мережі; розглянуто впровадження систем комутації та сигналізації мережі; відпрацьовано правила маршрутизації, захисту, синхронізації та управління комутацією; визначаються матриці мовного та сигнального трафіку; оцінено необхідне обладнання для реалізації вищезазначених завдань. Далі слід детальний план з вибраною кількістю входів (наприклад, схема мережі, план маршрутизації, цифровий аналіз, деталі керування, план нумерації, план завантаження тощо), з урахуванням можливого майбутнього розширення мережі [14].]

Планування мережі стільникової передачі (CTNP). На цьому етапі основним завданням є розробка структури (топології) мережі, яка забезпечує взаємодію між усіма вузлами мережі (базові станції, базові контролери, центр комутації).

Аналіз математичних моделей, що описують зміни вимог користувачів до підключення до ТМ, включає відбір математичних функцій методами математичного аналізу для опису зміни кількості користувачів, підключених до мережі в різні періоди її функціонування. У загальному випадку надходження вимог щодо збільшення пропускної здатності мережі є випадковим процесом. Проте задовільні результати можна отримати, створивши модель вимог з використанням детермінованої функції часу. Така модель повинна завжди однозначно визначати вимоги до мережевих послуг. Тобто, якщо досліджуваний період часу, T - дискретний або безперервний набір, модель вимог являє собою певне відображення T у множині невід'ємних дійсних чисел $D: T \rightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$. Під цим ми маємо на увазі асимптотично точну оцінку реального процесу розвитку

мережі $D^*(t) = \Theta(D(t))$. Такий підхід дозволяє описати найважливіші характеристики процесу: швидкість і відносну величину зростання мережі, точки крайніх і перегинів, не відволікаючись на невеликі коливання реального процесу.

Розглянуто різні варіанти реалізації числової функції одного аргументу для визначення вимог до мережевих послуг у кожен момент часу. Дослідження показало, що лінійну функцію часу можна використовувати для моделювання стабільних періодів розвитку мережі за відносно короткий період. Використання степеневі функції форми $D(t) = t^\alpha$, $\alpha \in \mathbb{R}$, $\alpha \neq 0$, $\alpha \neq 1$ дозволяє описати широкий спектр процесів, зокрема коли $\alpha > 1$, функція описує процеси швидкого розвитку, в яких кількість користувачів зростає швидко, чим далі, тим інтенсивніше. В $0 \leq \alpha \leq 1$ - тривалий період розвитку мережі, спочатку швидко зростання, яке поступово сповільнюється. В $\alpha < 0$ - падіння попиту на послуги. Подібним чином досліджуються експоненціальна, логарифмічна, тригонометрична та інші функції. Найзручнішою виявилася функція логістики $D(t) = a/(1 + be^{-ct})$, що в залежності від конкретних значень їх параметрів і співвідношення між ними дозволяє відображати на ТМ різні процеси: відсутність розвитку; необмежений ріст; необмежений спад; логістичний або екологічний розвиток. Розглянуті математичні моделі дозволяють адекватно описати динаміку вимог користувача до підключення до мережі.

Сучасні ТМ розраховані на надання великої кількості різноманітних послуг. Планування будь-яких змін у них базується на характеристиках інфокомунікаційних послуг (ІКС), для яких призначена мережа. Для формалізації вимог до характеристик ТМ проведено аналіз існуючих і запропонованих ІКП та їх класифікація. Класифікацію ІСР проводили методами багатовимірною статистичного аналізу. Крім того, для опису сполучення і взаємодії типу послуги, методу модуляції або кодування сигналу, режиму передачі інформації, технології, що використовується в мережі доступу, і середовища передачі інформації, краще використовувати шарова модель ІСР.

Для опису топології мережі описується математична абстракція у вигляді кінцевого орієнтованого зваженого графа, який описується набором вузлів мережі. I , кілька ліній підключення V і функція відстані між університетами D . Характер об'єктів множини I не є значущим, тому ми вважаємо їх послідовними натуральними числами $I = \{i \in \mathbb{N} \mid 1 \leq i \leq n\} = \{1, 2, \dots, n\}$. Пучок каналів розглядається як упорядкована пара вузлів, а відстань між ними як функція $\Delta : I^2 \rightarrow \mathbb{R}$, який представляє набір пар вузлів у наборі дійсних чисел і є цілісним у своїй області визначення та симетричним відносно своїх параметрів. Сформульовано умови, яким повинна відповідати функція $\Delta : I^2 \rightarrow \mathbb{R}$ бути метрикою для безлічі вузлів мережі та описувати не тільки фізичну відстань між вузлами, але й інші характеристики, такі як довжина кабелю. Вводяться умови, викладені до функції відстані, і на основі отриманої метрики будується умовна матриця відстаней, коефіцієнтів тяжіння між цими вузлами тощо. Доведено, що період дослідження можна представити у вигляді послідовності натуральних чисел, доповнених нулем $T = \{k\}_{k=0}^h = \{0, 1, 2, \dots, h\}$. Проведене доведення показує можливість спрощення математичних структур, що використовуються при описі мережі, без зниження загальності та втрати точності.

Міжвузлове навантаження в кожній точці часу має бути представлено у вигляді числової функції, заданої на декартовому добутку множини пар вузлів і моментів часу. Значення цієї функції можуть відповідати як значенням фактичних вимірювань навантаження між вузлами в даний момент часу, так і даним, отриманим в результаті прогнозу. Якщо представити інтенсивність навантаження як величину, розподілену в часі та просторі $Y : I^2 \times T \rightarrow \mathbb{R}$, то для функції, яка визначає цей розподіл, можна вибрати просторові та тимчасові перетини. Зафіксувавши момент часу, отримуємо функцію, що залежить тільки від простору, і навантаження між вузлами $Y(t) = \|\vartheta_{ij}(t)\| \in M_n(\mathbb{R})$. Аналогічно, фіксуючи пару вузлів, для яких навантаження залежить тільки від часу, отримуємо функцію однієї змінної $\vartheta_{ij} : T \rightarrow \mathbb{R}$, $\vartheta_{ij}(t) = Y(i, j, t)$. Враховуючи

дискретність та скінченність розглянутого періоду часу, отримано скінченну систему матриць навантаження, що дозволяє реалізувати просторово-часове представлення міжвузлового навантаження. Аналогічно формалізовані вимоги до підключення нових користувачів за допомогою функції $S : I \times T \rightarrow \mathbb{R}$ що встановлює вимоги $S(i, t)$ для підключення до вузла i на даний момент t . Фіксуючи довільний вузол, отримуємо систему функцій з одним аргументом $s_i : T \rightarrow \mathbb{R}$, кількість функцій якого дорівнює кількості вузлів мережі.

Необхідно вибрати класи комутаційної системи (СК) і ввести їх формалізовані описи у вигляді дисплея $X : I \times T \rightarrow 2^{A \cup B \cup R}$, де $2^{A \cup B \cup R}$ - бульварна сукупність типів СК, А - клас типів СК існуючих технологій; В - клас типів базового обладнання нових технологій; R - клас типів комутаційних блоків (SW) нових технологій. Вартісні параметри ІМС кожного типу задаються у вигляді наступних функцій: $\tilde{c} : A \cup B \cup R \rightarrow \mathbb{R}$ - річні витрати на утримання одиничної потужності ІМС; $c_0^* : B \cup R \rightarrow \mathbb{R}$ - витрати на нову СК при зверненні; $c_r^* : B \cup R \rightarrow \mathbb{R}$ - витрати на СК при заміні; $\hat{c} : A \rightarrow \mathbb{R}$ - витрати на одноразове збільшення потужності існуючої ІМС; $\hat{c}_0 : B \cup R \rightarrow \mathbb{R}$ - витрати на одноразове збільшення ємності нової ІМС при застосуванні; $\hat{c}_r : B \cup R \rightarrow \mathbb{R}$ - витрати на одноразове збільшення ємності ІМС при заміні; $\bar{c} : A \cup B \rightarrow \mathbb{R}$ - вартість одиниці довжини кабелю.

Запропоновано модифіковане представлення ставки дисконту, щоб привести значення майбутніх грошових потоків до поточної вартості у вигляді $C^* = C_t / (1+i)^t = \left[1 / (1+i)^t = e^{-\rho t}; \rho = \ln(1+i) \right] = C_t e^{-\rho t}$, де C^* - теперішня вартість майбутніх витрат; C_t - величина майбутніх витрат; i - ставка дисконтування; ρ - Змінене представлення ставки дисконту; t — момент часу, що відповідає періоду, в якому розглядаються майбутні витрати. Для врахування можливості повторного використання виведеного з експлуатації обладнання

вводиться чиста залишкова вартість за одиницю наявного обладнання $c_s : A \rightarrow \mathbb{R}$

Слід зазначити, що необхідно розглядати стани вузла та допустимі переходи між ними у вигляді частково впорядкованої множини, що дозволить формалізувати опис будь-якого з можливих станів вузла та будь-якої кількості переходів. Для вузлів від віддалених модулів (VM) опорний вузол, до якого в даний момент підключений конкретний пульт, визначається шляхом відображення $Y : E_R \rightarrow I_B$, де $E_R = \{ \langle i, t \rangle \mid i \in I, t \in T : X(i, t) \cap R \neq \emptyset \}$ - набір точок, які потребують допоміжного обладнання, $I_B = \{ i \mid i \in I : \exists t \in T ; X(i, t) \cap B \neq \emptyset \}$ - сукупність потенційних опорних точок простору. Це відображення визначає опорний вузол $Y(i, t) \in I$ до якого підключена віртуальна машина i на даний момент t . Підключення до VM j до опорного вузла i на даний момент t маркування $y_j(t) = i$, на $x_j(t) \cap R \neq \emptyset$ і $x_j(t) \cap B \neq \emptyset$. Змініть віддалене підключення j - $\exists t \in T, i, k \in I, i \neq k, t > 0 : y_j(t-1) = i \wedge y_j(t) = k$. Структуру з'єднань мережеских видалення можна назвати набором з'єднань для кожного вузла мережі. Строго стаціонарне підключення вузла j - зв'язок, незмінний у всій часовій області $y_j(t) \equiv \text{const}$. Узагальнене стаціонарне вузлове з'єднання j - зв'язок, інваріантний на відрізку $[\theta_j, h]$, де θ_j - момент накладання VM на вузол j $\forall t \in T : \theta_j < t \leq h \quad y_j(t) = y_j(t-1)$. Строго (узагальнена) фіксована структура зв'язку в мережі - структура з'єднань по всій мережі, якщо кожен з вузлів зв'язків є строго (узагальненим) стаціонарним.

Виходячи з часової структури задачу оптимізації ТМ за рівнем складності можна розділити на 4 класи: K_1 : структура мережеских з'єднань строго стаціонарна $\forall j \in I \quad y_j(t) \equiv \text{const}$; K_2 : структура зв'язків загалом стаціонарна $\forall j \in I, t_1, t_2 \in T : \theta_j < t_1, t_2 \leq h \quad y_j(t_1) = y_j(t_2)$;

K_3 : дозволена будь-яка структура, але без змін підключення
 $\forall j \in I, t_1, t_2 \in T : y_j(t_1), y_j(t_2) \in I \Rightarrow y_j(t_1) = y_j(t_2)$;

K_4 : Допускається довільна структура підключення. Ці класи утворюють ланцюжок включень $K_1 \subset K_2 \subset K_3 \subset K_4$ де проблема K_1 виключити можливість введення ВК.

Основні фактори, які необхідно враховувати при оптимізації ТМ: модель вимог до її розробки; топологія; потенційні точки розташування ВК; конструктивна надійність і живучість; вибір принципу зв'язку між конкретними вузлами; узгодженість з обладнанням; визначення вірогідно-часової структури потоків викликів та її прогнозування на досліджуваний період; можливість інвестування; співвідношення між реальним станом мережі та необхідними інвестиціями. Список факторів можна розширити, але з вищесказаного видно, що всі їх можна певним чином згрупувати. Перша група факторів відноситься до різних характеристик існуючої мережі, що підлягає модернізації. Другий - до техніко-економічних параметрів обладнання, що впроваджується. Третій пов'язаний з вимогами до обслуговування користувачів і визначає необхідну швидкість росту мережі, ефективність її роботи та показники якості обслуговування. Четверта група об'єднує економічні фактори.

Відомо, що певні джерела сигналу створюють «розриви» або довгі послідовності лише 1 або 0 с. У цих випадках ефективніше передати код для довжини прогону, ніж усі біти, які представляють сам запуск. Одним із джерел довгих перегонів є факс. Факс працює шляхом сканування документа та відображення дуже малих ділянок документа в чорному (елементі зображення) або білому пікселі. Документ розділений на ряд рядків (приблизно 100 на дюйм), кожен рядок містить 1728 пікселів (у стандартній роздільній здатності). Якби всі чорні пікселі відображалися в 1, а всі білі пікселі в 0, відсканований документ був би представлений 1857600 бітами (для стандартної американської 11-дюймової сторінки). У старших модемів швидкість передачі даних становить 4800

біт на секунду, для відправки однієї сторінки знадобиться 6 хвилин 27 секунд. Однак, якби послідовності 0 і 1 були стиснуті кодом довжини виконання, час передачі значно скоротився б.

Код для факсиміле насправді є комбінацією коду довжини циклу та коду Хаффмана; це можна пояснити наступним чином: код довжини виконання відображає довжини виконання в кодових словах, а кодова книга поділена на дві частини. Перша частина містить символи для довжин, кратних 64; друга частина складається з прогонів від 0 до 63 пікселів. Будь-яка довжина прогону буде представлена як кратне 64 плюс деякий залишок. Наприклад, рядок розміром 205 пікселів буде надіслано з використанням кодового слова для пробігу 192 (3×64) плюс кодове слово для пробігу 13. Таким чином, кількість бітів, необхідних для представлення пробігу, значно зменшується. Крім того, певні тригери, які, як відомо, мають більшу ймовірність, кодуються в кодових словах короткої довжини, що ще більше зменшує кількість бітів, що підлягають передачі.

Як описано в Вихідне кодування, однією з цілей вихідного кодера є усунення зайвих двійкових цифр з оцифрованого сигналу. З іншого боку, стратегія каналного кодера полягає в додаванні надмірності до переданого сигналу - у цьому випадку, щоб можна було виправити помилки, викликані шумом під час передачі приймач. Процес кодування для захисту від помилок каналу називається кодуванням контролю помилок. Коди контролю помилок використовуються в різних програмах, в т.ч. супутниковий зв'язок, глибокий космос спілкування, мобільний радіо комунікації та комп'ютерні мережі.

Існують два широко використовуються методи захисту електронно переданої інформації від помилок. Один із методів називається прямим керуванням помилками (FEC). У цьому методі інформаційні біти захищені від помилок шляхом передачі додаткових надлишкових бітів, так що, якщо під час передачі виникають помилки, декодер може використовувати зайві біти, щоб визначити, де виникли помилки та як їх виправити. Другий метод контролю помилок називається автоматичним запитом на повторення (ARQ). У цьому

методі до переданої інформації додаються додаткові біти, які використовуються приймачем для виявлення помилок. Потім приймач сигналізує про запит на повторну передачу. Як правило, кількість додаткових бітів, необхідних просто для виявлення помилки, як у системі ARQ,

Один простий, але не зазвичай реалізовано, метод FEC полягає в тому, щоб надіслати кожен біт даних тричі. Приймач перевіряє три передачі і більшістю голосів вирішує, чи є 0 чи 1 вибіркою вихідного сигналу. У цій кодованій системі, яка називається кодом повторення з довжиною блоку в три і швидкістю в одну третину, для передачі того ж сигналу, що і в некодованій системі, використовується втричі більше біт за секунду; отже, для фіксованого доступного пропускну здатності закодована система може передавати лише на третину більше сигналів, ніж незакодована система. Підсилення полягає в тому, що тепер принаймні два з трьох закодованих бітів повинні бути помилковими, перш ніж виникне помилка прийому.

Інший простий приклад коду FEC відомий як код Хеммінга. Цей код здатний захистити чотирирозрядний інформаційний сигнал від однієї помилки в каналі шляхом додавання до сигналу трьох додаткових бітів. Кожна послідовність із семи бітів (чотири інформаційні біти плюс три надлишкові біти) називається кодовим словом. Перший надлишковий біт вибирається таким чином, щоб сума одиниць у перших трьох інформаційних бітах плюс перший надлишковий біт була парним числом. Цей розрахунок називається перевірка на парність, а надлишковий біт називається бітом парності. Другий біт парності вибирається таким чином, щоб сума біт в останніх трьох інформаційних бітах плюс другий біт парності була парною, а третій біт парності вибирався так, щоб сума одиниць у першому, другому та четвертому інформаційних бітах була парною. і останній біт парності парний. Цей код може виправити помилку одного каналу, перерахувавши перевірку на парність. Помилка перевірки парності вказує на помилку в одному з перевірених елементів, а наступні дві перевірки на парність шляхом усунення визначають точне місце помилки. Таким чином, код

Хеммінга може виправити будь-яку помилку, що виникає в будь-якій із семи позицій. Однак, якщо виникає подвійна помилка, декодер вибирає неправильне кодове слово.

Код Хеммінга називається блоковим, оскільки інформація блокується в бітових послідовностях кінцевої довжини, до яких додається ряд додаткових бітів. Коли k інформаційних бітів надаються в блочний кодер, $n - k$ бітів резервування додаються до інформаційних бітів для формування переданого кодового слова з n бітів. Таким чином, все кодове слово довжини n повністю визначається одним блоком з k інформаційних бітів. В іншій схемі каналного кодування, відомій як згорткове кодування, вихідний сигнал кодера природним чином не сегментується на блоки, а замість цього є нескінченним потоком бітів. При згортковому кодуванні пам'ять включається в процес кодування, так що попередні M блоків з k інформаційних бітів разом з поточним блоком з k інформаційних бітів визначають вихід кодера. Кодер досягає цього шляхом переміщення між кінцевою кількістю «станів» або «вузлів». Існує кілька варіацій згорткового кодування, але найпростіший приклад можна побачити в так званому $(n, 1)$ кодері, в якому поточний блок з k інформаційних бітів складається лише з одного біта. У кожному заданому стані кодера $(n, 1)$, коли отримано інформаційний біт (0 або 1), кодер передає послідовність з n бітів, призначених для представлення цього біта, коли кодер знаходиться в цьому поточному стані. У той же час кодер переходить лише в один із двох можливих наступних станів, залежно від того, чи був інформаційний біт 0 чи 1. У цьому наступному стані, у свою чергу, наступний інформаційний біт представлений певною послідовністю з n бітів, і кодер знову переводиться в один із двох можливих наступних станів. Таким чином, послідовність інформаційних бітів, що зберігаються в пам'яті кодера, визначає як стан кодера, так і його вихід, який модулюється і передається по каналу. У приймачі демодульована бітова послідовність порівнюється з можливими бітовими послідовностями, які можуть бути створені кодером. Приймач визначає послідовність бітів, які, швидше за все, були передані, часто

шляхом ефективного декодування алгоритм називається декодуванням Вітербі (на честь його винахідника А.Я. Вітербі). Загалом, чим більше пам'яті (тобто більше станів) використовує кодер, тим краща продуктивність коду при виправленні помилок – але тільки завдяки складнішому алгоритму декодування. Крім того, чим більше біт (n) використовується для передачі інформації, тим краще продуктивність - за рахунок зниження швидкості передачі даних або більшої пропускної здатності.

Процеси кодування та декодування, подібні до описаних вище, використовуються в решітчастому кодуванні, схемі кодування, що використовується у високошвидкісних модеми. Однак замість послідовності бітів, створеної згортковим кодером, кодер решітки створює послідовність символів модуляції. На передавачі процес канального кодування поєднується з процесом модуляції, створюючи систему, відому як решітчасто-кодована модуляція. На приймачі декодування і демодуляція виконуються разом для оптимізації роботи алгоритму виправлення помилок.

У багатьох телекомунікаційних системах необхідно подавати інформаційний сигнал з формою хвилі, яка може точно проходити через середовище передачі. Це призначення відповідної форми сигналу виконується за допомогою модуляції, що є процесом, за допомогою якого деяка характеристика несуча хвиля змінюється в залежності від інформаційного сигналу або модулюючої хвилі. Модульований сигнал потім передається по каналу, після чого вихідний інформаційний сигнал відновлюється за допомогою процесу демодуляції.

2.3 Розробка алгоритмів багатопараметричної оптимізації телекомунікаційної мережі

Процес оптимізації телекомунікаційних мереж дуже важливий для створення нової мережі або для зміни ресурсів існуючої мережі. Основними причинами, що ускладнюють оптимізацію ТМ, є взаємозалежність факторів, що впливають на її результати. Одночасний врахування великої кількості взаємозалежних факторів вимагає розробки спеціальних методів оптимізації мережі та відповідного аналітичного апарату. Тривалість перехідного періоду залежить від багатьох факторів, серед яких стан існуючої мережі, інвестиції, термін окупності обладнання, ступінь зносу існуючого обладнання, необхідний темп зростання існуючої мережі, інфляція та багато інших факторів. Відповідно, при оптимізації необхідно враховувати вплив цих факторів. Малюнок 2.

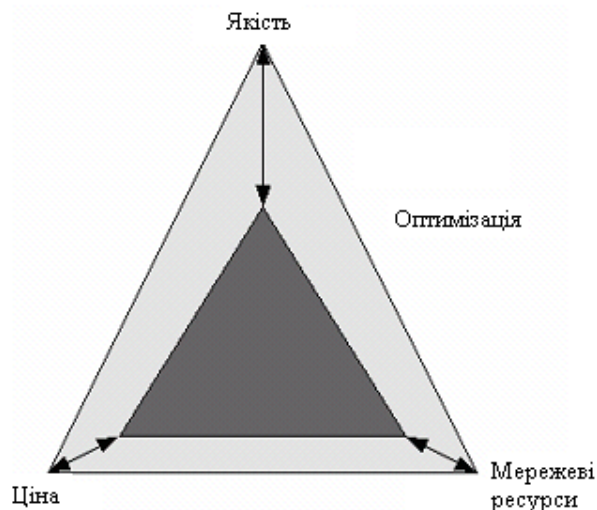


Рисунок 2.3 - Процес оптимізації мережі

Оптимізація процесів дозволяє змінити якість мережі, що змінить вартість і ресурси мережі. Хоча результати, отримані в процесі оптимізації, часто покращують якість мережі при збільшенні вартості та ресурсів мережі.

Розглянемо алгоритм оптимізації доступу до мережі. В даний час існують методи розрахунку доступу до оптимізації мережі, які використовуються для пошуку оптимальних рішень лише за одним обраним критерієм або параметром, тому використовувати їх для вирішення завдань з точки зору вартості та якості стає проблематично. Тому пропонується використовувати комбіновані методи оптимізації доступу, які отримують шляхом об'єднання методів з мінімальними витратами, якістю та багатопараметричною оптимізацією. Алгоритм оптимізації доступу до мережі, отриманий з використанням та комбінуванням методів з мінімальними витратами та визначенням меж параметрів якості. Для цього в цільову функцію (формула (2.1)) необхідно ввести умови багатопараметричної оптимізації, тобто визначити n змінних, за якими буде здійснюватися оптимізація доступу до мережі. В цьому випадку, мінімізація вартості мережі доступу виражається через C - витрати на реалізацію мережі; A - змінні доступу до мережі; B - розмір елемента сітки (площа), км²; L - розмір (площа) зони покриття, км², T - змінні, що використовуються в технології доступу до мережі; M - тип каналу/передачі інформації; R - швидкість передачі даних, Кбіт/с; H - дисципліна для цих пакетів послуг; V - спосіб доступу до каналу; W - тип модуляції; G - тип кодека: W - тип модуляції; G - тип кодека: W - тип модуляції; G - тип кодека: M - тип каналу/передачі інформації; R - швидкість передачі даних, Кбіт/с; H - дисципліна для цих пакетів послуг; V - спосіб доступу до каналу; W - тип модуляції; G - тип кодека: W - тип модуляції; G - тип кодека: W - тип модуляції; G - тип кодека: M - тип каналу/передачі інформації; R - швидкість передачі даних, Кбіт/с; H - дисципліна для цих пакетів послуг; V - спосіб доступу до каналу; W - тип модуляції; G - тип кодека: W - тип модуляції; G - тип кодека: W - тип модуляції; G - тип кодека:

$$C_{\min} = f(A, T), \quad A \in A, \quad T \in T, \quad (2.1)$$

$$A = (B, L), \quad T = (M, R, H, V, W, G)$$

$$C_{\min} = f(A^*, T^*) = \min \quad (2.4)$$

У додатку Б представлена блок-схема алгоритму етапів оптимізації мережі. Для початку ви повинні ініціалізувати змінні та накласти обмеження. Наступним кроком є встановлення алгоритму пошуку дійсних рішень. Якщо рішення вірне, то виконується алгоритм пошуку дійсних рішень, інакше пошук оптимального рішення не виконується. На останньому етапі відображаються дані оптимізації.

Для побудови алгоритму оптимізації мережі доступу необхідно враховувати залежність витрат і параметрів якості Q_1, Q_2, \dots, Q_r . Запропонований алгоритм встановлює показники якості початкового доступу до структури мережі та розраховується як Q_1, Q_2, \dots, Q_r , які перевіряються на відповідність певним стандартам якості відповідно до обмежень, наведених у формулі 2.3. У тому випадку, якщо хоча б один фактор не задовольняє цій умові, буде змінено значення змінної, яка найбільше впливає на незадовільний коефіцієнт норми. Розглянемо докладно кроки алгоритму для оптимізації доступу до мережі:

- 1) задаються вихідні дані: готується цифрова карта ГІС (геоінформаційної системи), площа території, прогнозується кількість користувачів;
- 2) визначено межі показників якості Q_1, Q_2, \dots, Q_r , що має бути забезпечено шляхом оптимізації доступу до мережі;
- 3) змінні B, L, M, R, H, V, W, G сортуються залежно від їх можливого впливу на досягнення мети та вводяться обмеження функцій;
- 4) території території класифікуються залежно від технології доступу до мережі: а) у разі кабельної мережі; б) у разі радіомережі;
- 5) вказати кількість станцій n . Визначається розташування станцій та їх розподіл;
- 6) визначаються межі станцій. Буде розраховано витрати абонентів, підключених до станції;

7) вивчаються прийнятні рішення. Змінні та їх значення повинні коригуватися відповідно до впливу на витрати та критеріїв якості;

8) пошук оптимального рішення:

а) послідовно вибирається змінна, яка знижує значення цільової функції S ;

б) відповідно до обраних значень змінні стандарти якості повинні бути розраховані Q_1, Q_2, \dots, Q_r ;

в) перевіряються значення змінних Q_1, Q_2, \dots, Q_r ;

г) якщо обмеження змінної порушено, необхідно вибрати змінну послідовно Q_{kp} , що впливає на обмеження, але значення цільової функції не повинно від цього залежати. Якщо такої змінної немає, то в умові а) потрібно збільшити індекс на 1 ($i = i + 1$);

д) якщо межа не досягнута, то значення вибраної змінної необхідно змінити (індекс $j = j - 1$) і повторити пункт б). Якщо межі досягнуті, повторити пункт а) збільшивши індекс на 1 ($i = i + 1$);

д) якщо змінна, яка зменшує значення цільової функції, не знайдена, то оптимального рішення немає;

ж) для оптимального рішення досліджуються витрати на обслуговування підключених до мережі абонентів ($C(E) \rightarrow \min$).

Таким чином, здійснюється пошук оптимальної структури мережі доступу, відповідно до витрат на обслуговування та якості передачі даних.

Оптимізація доступу до мережі поліноміально не залежить від часу, оскільки кількість змінних і їх можливі значення можуть змінюватися. Щоб знайти зменшення кількості можливих варіантів, потрібно використовувати стрічку змінних, які теоретично підтверджені для простої задачі оптимізації (наприклад, алгоритм «рюкзак»). У разі доступу до мережі оптимізацію змінної змінної необхідно виконувати окремо відповідно до їх впливу на цільову функцію та введену функцію обмеження. Для визначення кінцевого значення необхідно проаналізувати цільову функцію (витрати), функцію обмежень

(стандартів якості) та залежності змінних, заданих в алгоритмі. На основі розробленої алгоритмічної процедури оптимізації,

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Функціональна структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення є життєво важливим компонентом всієї телекомунікаційної мережі. Проміжне програмне забезпечення телекомунікаційного програмного забезпечення може допомогти перенаправленим мережам спілкуватися один з одним. Наприклад, MS Explorer.

Функції телекомунікаційного програмного забезпечення: Пакет телекомунікаційного програмного забезпечення надає різноманітні послуги підтримки зв'язку. Існують деякі особливості телекомунікаційного програмного забезпечення. Це:

1. Контроль доступу: Ця функція встановлює з'єднання між терміналом і комп'ютером у мережі. Програмне забезпечення працює з комунікаційним процесором (наприклад, модемом) для підключення та відключення каналів зв'язку та встановлення параметрів зв'язку.

2. Управління передачею: Ця функція дозволяє комп'ютерам і терміналам надсилати квитанції, команди, дані повідомлень і програми.

3. Управління мережею: Ця функція надсилає комунікаційні повідомлення в телекомунікаційній мережі.

4. Контроль помилок: Ця функція забезпечує виявлення та виправлення помилок передачі. Помилки зазвичай викликані спотвореннями в каналі зв'язку, такими як шум лінії та стрибки напруги.

5. Управління безпекою: Ця функція захищає комунікаційну мережу від несанкціонованого доступу. Мережева операційна система або інша програма безпеки обмежує доступ до файлів даних та інших обчислювальних ресурсів у локальних мережах та інших типах мереж.

Однією з головних особливостей програмного забезпечення управління мережею є відкрита модульна архітектура, яка дозволяє розробляти та впроваджувати нові модулі, працювати з існуючими програмами та оновлювати існуючі модулі. Змодельована мережа складається з різних типів компонентів комутаційного пристрою. Крім того, для реалізації інтегрованого управління системами і мережами, незалежно від їх виробника, підтримується більша кількість інтерфейсів, ніж у звичайних мережах (можуть використовуватися різні стандарти і протоколи, такі як SNMP, OSI, ASCII, CORBA).

Система управління повинна являти собою комплекс рішень, що забезпечують управління мережами, реалізованим на основі різних технологій (мережі фіксованого та мобільного телефонного зв'язку, мережі передачі даних, сигналізації тощо), що надають різні послуги та побудовані на обладнанні різних виробників. Він побудований за допомогою об'єктно-орієнтованої розподіленої структури, реалізованої в Matlab 6.5, і її інтерфейси повинні бути відкритими – відмінними рисами таких інтерфейсів є: стандартизовані протоколи (наприклад, ПІР, СМІР, SNMP, FTP, FTAM тощо) [13].

Протоколи СМІР, SNMP або CORBA можна використовувати для надсилання повідомлень про тривогу за допомогою об'єктної моделі, визначеної в Рекомендації X.733; Інтерфейси CORBA можна використовувати для організації послуг; протокол FTP можна використовувати для надсилання даних про продуктивність.

Основні вимоги до системи управління оптимізацією мережі:

- підготовлене рішення на практиці має бути реалізовано в стислі терміни;
- структура систем повинна забезпечувати гнучкість впровадження і сумісність з іншими рішеннями, високу надійність і як наслідок - якість обслуговування;
- оператор повинен мати можливість модифікувати програмне забезпечення для реалізації конкретних функцій і впроваджувати нові послуги шляхом зміни конфігурації;

- компонентні рішення спрощують можливість оператора вводити нових користувачів і функції;

- масштабованість і гнучкість, що дозволяє легко адаптуватися до нових технологій і продуктів, а також до потреб користувачів, що змінюються.

Для спрощення управління доцільно мати окремі підсистеми керування різними ділянками транспортної мережі (WDM, SDH, ATM тощо) та передачею даних.

Організація управління мультисервісною мережею вимагає взаємодії систем управління, що належать різним операторам і постачальникам послуг, з використанням вищої системи моніторингу над підсистемами управління. Завдання конфігурації, контролю якості та аварійного моніторингу в мережі одного оператора будуть внутрішніми, а завдання надання та забезпечення якості послуг від кінця до кінця будуть вирішуватися спільно операторами різних мереж.

Модульна структура передбачає наявність інтегрованих підрозділів, які виконують різноманітні завдання управління та моніторингу:

- аварійний нагляд;
- управління топологією;
- моніторинг та управління безпекою;
- управління системами та процесами.

Управління якістю повинно здійснюватися на рівні управління викликом і в рамках взаємодії пакетної мережі. Необхідно забезпечити взаємодію з системою управління як нових послуг, так і постачальників та користувачів інформації.

Система моніторингу забезпечує централізоване управління відмовами та топологією мережі, функції спільного моніторингу та управління мережею та сервісами, робоче місце оператора є центральним пунктом для створення окремих функцій управління.

Важливою вимогою до рішень, отриманих під час використання телекомунікаційної мережі, є забезпечення адаптивного характеру обмеження трафіку, що надходить у мережу. У разі перевантаження мережі, з одного боку, слід обмежити малопріоритетний трафік, а з іншого – трафік, який є джерелом перевантаження телекомунікаційної мережі. Крім того, процес адаптивного обмеження трафіку має бути превентивним, тобто інтенсивність трафіку, що надходить у мережу, має бути обмежена не після перевантаження мережі, а завчасно, запобігаючи таким чином виникненню перевантажень глобального характеру.

3.2 Реалізація програмного забезпечення

Однією з найважливіших управлінських завдань, які вирішуються в телекомунікаційних мережах, є завдання маршрутизації - вибору шляху для інформаційних пакетів, які надходять до вузла мережі. Маршрутизатор повинен вибрати оптимальний шлях для кожного вхідного пакета інформації, причому оптимальність шляху може бути визначена за одним критерієм або кількома. Найбільш використовуваним критерієм оптимальності є так звана «ціна» маршруту, яка є величиною, пропорційною до пропускної здатності каналу зв'язку. Обернено пропорційна залежність між пропускною здатністю та ціною маршруту зводить завдання вибору оптимального маршруту для інформаційного пакета до завдання пошуку маршруту мінімальної ціни.

Ціна маршруту між двома сусідніми вузлами мережі розраховується як округлений до найближчого цілого відношення деякого великого числа (наприклад, 108) до пропускної здатності каналу, вираженого в бітах на секунду. Номер, для якого розраховується ціна маршруту, вибирається таким чином, щоб ціна каналу з найбільшою пропускною здатністю дорівнювала 1.

Знайти оптимальний маршрут можна за допомогою різних алгоритмів. Наприклад, широко поширений протокол OSPF використовує алгоритм Дейкстри для пошуку оптимального шляху. Нижче наведено рішення проблеми маршрутизації за допомогою методу динамічного програмування [12].

Розглянемо приклад телекомунікаційної мережі, що складається з семи вузлів (маршрутизаторів), які з'єднані між собою каналами різної пропускної здатності (рисунок 3.1).

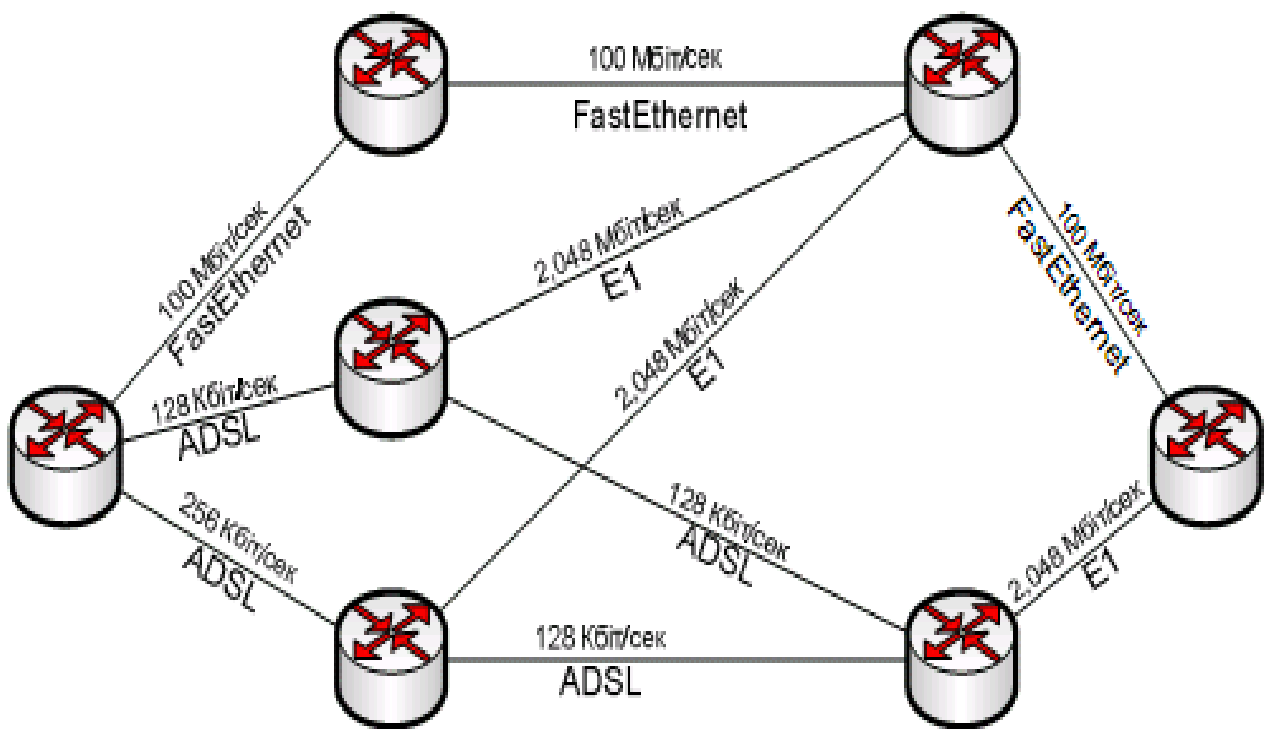


Рисунок 3.1 - Схема мережі, яка складається з семи маршрутизаторів

Існуючі засоби управління трафіком, які відповідають за його формування, розподіл (маршрутизацію) та обмеження розподіляються, виходячи з інформації про середню швидкість мережевих пакетів, зазначеної в угоді QoS, топології мережі [13].

Після перетворення значень пропускної здатності в ціни каналів схема набуде іншого вигляду (рисунок 3.2).

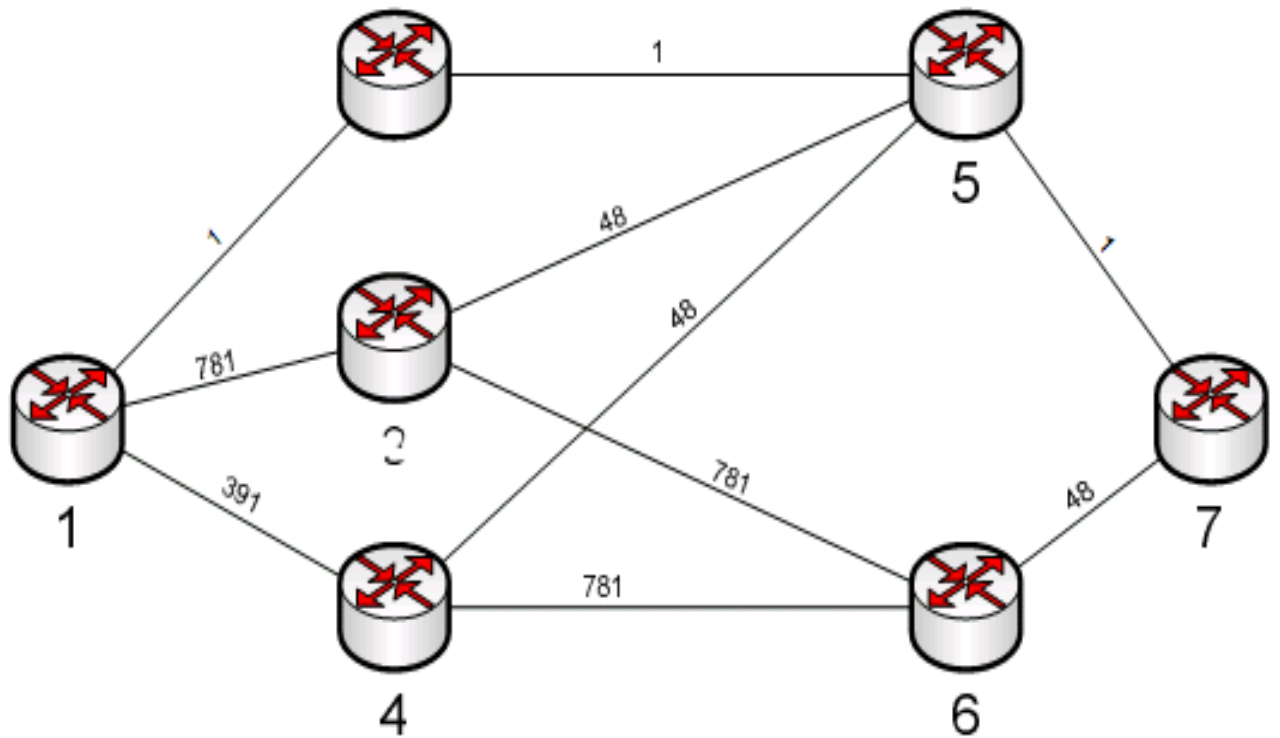


Рисунок 3.2 - Діаграма мережі, представлена у вигляді графіка

Щоб вирішити задачу маршрутизації інформаційного пакета, наприклад, від вузла 1 до вузла 7, потрібно описати отриманий граф матрицею з'єднань:

$$C = \begin{pmatrix} 999 & 1 & 781 & 391 & 999 & 999 & 999 \\ 1 & 999 & 999 & 999 & 1 & 999 & 999 \\ 781 & 999 & 999 & 999 & 48 & 781 & 999 \\ 391 & 999 & 999 & 999 & 48 & 781 & 999 \\ 999 & 1 & 48 & 48 & 999 & 999 & 1 \\ 999 & 999 & 781 & 781 & 999 & 999 & 48 \\ 999 & 999 & 999 & 999 & 1 & 48 & 999 \end{pmatrix},$$

де цифри 999 позначають неіснуючі комбінації на графіку.

Метод моделювання процесу маршрутизації в телекомунікаційній мережі на основі методу динамічного програмування реалізовано у вигляді програми середовища MATLAB.

Подаючи матрицю C на вхід розробленої програми, отримуємо: результат

Поточна вершина: 1

Наступна вершина: 2

Вартість: 1

результат (2) =

Поточна вершина: 2

Наступна вершина: 5

Вартість: 1

результат (3) =

Поточна вершина: 5

Наступна вершина: 7

Вартість: 1

(1) =

Результат буде введений в таблицю маршрутизації на вузлі 1 і буде застосований до всіх пакетів, адресованих вузлу 7. Маршрутизатор виконає подібні обчислення для всіх вузлів призначення, які доступні в його базі даних топології мережі, створюючи таким чином таблицю маршрутизації.

Для того, щоб описана вище програма змогла розв'язати задачу маршрутизації за критеріями оптимальності, необхідно внести деякі зміни у формат вхідних даних та алгоритм основної процедури. Вхідними даними програми будуть дві матриці: матриця з'єднань, яка міститиме інформацію про ціни на канали зв'язку між вузлами мережі, і матриця адміністративних

відстаней, яка буде відображати інформацію про протоколи маршрутизації, які використовуються в мережі.

Алгоритм основної процедури програми слід додати з урахуванням адміністративної відстані при обчисленні значення критерію оптимальності та перевіряти, що дозволить виключити з розгляду маршрути, які мають адміністративну відстань 255, тобто маршрути невідомого походження.

Щоб перевірити правильність роботи програми після змін, можна змінити схему мережі (рисунок 3.3), щоб зменшити вплив пропускної здатності каналу на вибір оптимального маршруту.

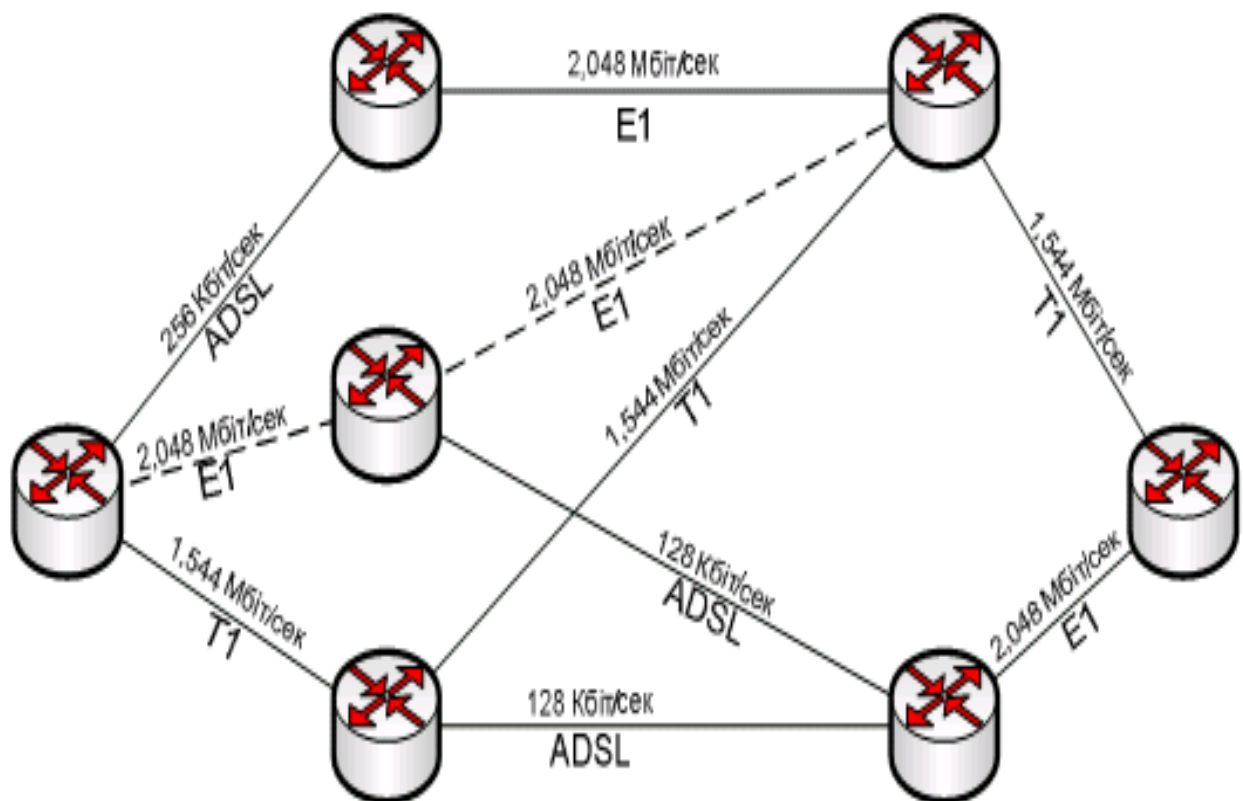


Рисунок 3.3 - Модифікована схема мережі

Після внесення змін до мережі є два шляхи, які відносно мало відрізняються пропускною здатністю - один з них проходить через вузли 1 - 3 - 5 - 7, інший - через вузли 1 - 4 - 5 - 7. Щоб перевірити вплив адміністративної відстані на вибір оптимального шляху, ми припускаємо, що інформація про

канали між вузлами 1 - 3 і 3 - 5 отримана за протоколом RIP, а про всі інші - за протоколом OSPF. Така зміна повинна призвести до того, що канали 1 - 3 і 3 - 5, незважаючи на їх більшу пропускну здатність, загалом будуть більш важливими для критерію оптимальності, ніж канали 1 - 4 і 4 - 5.

Вибір оптимального маршруту показано на рисунку 3.4.

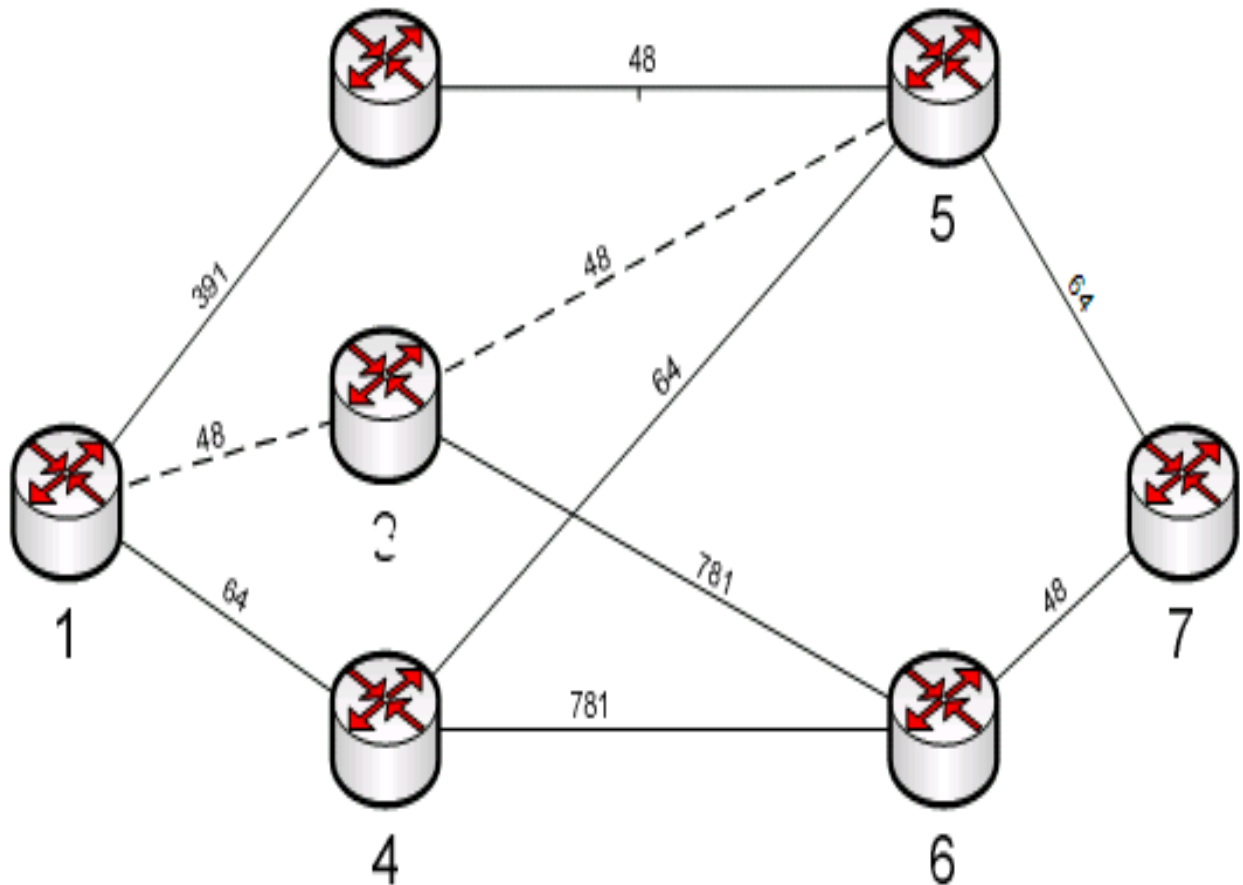


Рисунок 3.4 – Змінена схема мережі після перетворення пропускну здатності в ціни каналу

Як було сказано вище, вхідними даними програми будуть дві матриці - матриця зв'язків C , яка містить інформацію про ціни каналів, і матриця адміністративних відстаней D :

$$C = \begin{pmatrix} 999 & 391 & 48 & 64 & 999 & 999 & 999 \\ 381 & 999 & 999 & 999 & 48 & 999 & 999 \\ 48 & 999 & 999 & 999 & 48 & 781 & 999 \\ 64 & 999 & 999 & 999 & 64 & 781 & 999 \\ 999 & 48 & 48 & 64 & 999 & 999 & 64 \\ 999 & 999 & 781 & 781 & 999 & 999 & 48 \\ 999 & 999 & 999 & 999 & 64 & 48 & 999 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 999 & 110 & 120 & 110 & 999 & 999 & 999 \\ 110 & 999 & 999 & 999 & 110 & 999 & 999 \\ 120 & 999 & 999 & 999 & 120 & 110 & 999 \\ 110 & 999 & 999 & 999 & 110 & 110 & 999 \\ 999 & 110 & 120 & 110 & 999 & 999 & 110 \\ 999 & 999 & 110 & 110 & 999 & 999 & 110 \\ 999 & 999 & 999 & 999 & 110 & 110 & 999 \end{pmatrix}$$

Результатом роботи програми буде наступний маршрут:

результат (1) =

Поточна вершина: 1

Наступна вершина: 4

Вартість: 174

результат (2) =

Поточна вершина: 4

Наступна вершина: 5

Вартість: 174

результат (3) =

Поточна вершина: 5

Наступна вершина: 7

Вартість: 174

В результаті додавання адміністративної відстані як критерію оптимальності шлях 1 - 3 - 5 - 7 перестав бути оптимальним, незважаючи на більшу пропускну здатність каналів, що входять до нього.

3.3 Результати роботи пакету програм

Корпоративні мережі з'єднують підрозділи організації, локальних користувачів і віддалених користувачів і забезпечують доступ до ресурсів обробки інформації та комунікацій. Як правило, вони мають великі конструкції та багато додатків із суворими правилами безпеки. Корпоративні мережі підтримують сотні користувачів, у набагато більших випадках це число може становити сотні тисяч користувачів. Перед побудовою корпоративної мережі на етапі проектування корпоративної мережі створення сценаріїв корпоративної мережі з використанням надійного інструменту моделювання та проектування корпоративної мережі у віртуальному середовищі, моделювання використання мережевих додатків і мережевого трафіку, а також перевірка проекту забезпечують цінність і заощадити час.

Для перевірки результату, отриманого за допомогою розробленої програми, використано пакет OPNet, призначений для моделювання телекомунікаційних мереж. Узагальнені блоки ethernet4_slip8_gtwy використовувалися для імітації мережевих вузлів, які можуть імітувати роботу будь-якого IP-маршрутизатора. З'єднання між мережевими вузлами моделюються за допомогою каналів PPP (протокол «точка-точка»).

Моделювання мережі призначене для характеристики, створення та тестування комунікаційних рішень, комп'ютерних мереж і розподілених або паралельних систем. Це дозволяє передбачити поведінку та продуктивність

мережі. Ви можете створювати, запускати та аналізувати будь-який бажаний сценарій спілкування.

Як правило, моделювання є єдиним методом, який дозволяє безперервно тестувати та налаштовувати мережу, що складається з сотень і тисяч комунікаційних елементів (пристроїв, хостів, маршрутизаторів, комутаторів, серверів тощо), оскільки стандартна лабораторія працювати не буде, а польова тести дорогі, складні в експлуатації та недетерміновані.

Доступні різноманітні платформи моделювання, деякі з відкритим кодом і деякі комерційні: OPNET, QualNet, OMNET ++, NS-3...

Загальні характеристики всіх моделюючих платформ:

- детермінізм- моделювання одного і того ж сценарію даватиме абсолютно однакові результати після кожного запуску (така ж послідовність подій, ті самі явища і ті самі помилки);

- моделювання дискретних подій (DES)- сценарій виконання представлений упорядкованою послідовністю чітко визначених подій. Кожна подія складається з двох компонентів: запланованого часу та тригера механізму обробки подій. Для реалізації механізму DES платформа моделювання керує власною шкалою часу, яка не має нічого спільного з фактичним часом, тобто півгодинним сценарієм. Для створення складної системи, що складається з десятків пристроїв, подій, пакетів тощо, можуть знадобитися години або навіть дні;

- всі платформи моделювання є програмами з графічним інтерфейсом ПК (Windows та/або Linux);

- бібліотека моделей- реалізовані та готові до використання стандартні моделі: маршрутизатори та комутатори CISCO, брандмауери Check Point, хости, сервери, моделі трафіку додатків (HTTP, FTP, електронна пошта), фізичні з'єднання (кабелі, оптика, бездротовий зв'язок - навіть на основі на реальній місцевості), протоколи (маршрутизація - OSPF, BGP,..., канал даних і MAC (Ethernet, Wi-Fi, LTE), протоколи транспортного та прикладного рівня);

– інтегроване середовище розробки (IDE) -повна можливість реалізації власної моделі будь-якого компонента в моделюванні. IDE надає можливість створити кінцевий автомат і описати поведінку кожного стану за допомогою C/C++.

Додаткові функції, які можуть бути присутніми в платформі моделювання:

– Analyzer Tool - статистика поведінки мережі та продуктивності: пропускна здатність, збої, втрати пакетів, затримки, вузькі місця... Візуалізація поведінки мережі та графіки продуктивності

– System-in-the-Loop (SITL) - інтерфейс, що з'єднує операційні комунікаційні системи та програми (Real World) з моделюванням комунікаційних систем і додатків (Simulated World);

– паралельне моделювання - функція, яка дозволяє запускати сценарій моделювання розподіленим способом для скорочення часу виконання сценарію - багатоядерне та/або багатопроцесорне, розподілене (багатокомп'ютерне) моделювання.

OPNET Modeler, тепер відомий як Riverbed Modeler, є комерційною платформою моделювання, наданою Riverbed Technology.

Має дуже багату бібліотеку стандартних моделей, які в основному надають самі виробники. Ця бібліотека дозволяє створювати композицію практично будь-якої існуючої мережі на додаток до моделювання, аналізу мережі для порівняння впливу різних сценаріїв і технологій на наскрізну поведінку.

OPNET Modeler також має дуже зручну IDE для розробки ваших власних пристроїв, протоколів, мережевих механізмів і алгоритмів у всьому стеку зв'язку.

OPNET Modeler як імітаційна платформа може використовуватися для різних цілей або для будь-якої з них:

– планування мережі: планування, верифікація, прогнозний аналіз «що буде, якщо» та оптимізація комунікаційних мереж; взаємодія з Network Management для покращення реальних мереж;

– розробка нових компонентів: розробка протоколів, алгоритмів та додатків на основі моделювання;

– Ви можете реалізувати кросплатформенну структуру, яка дозволяє розробляти та запускати вихідний код реальної операції поверх моделювання OPNET. Це означає, що в реальному обладнанні і в моделюванні виконується точно одна і та ж реалізація, так званий принцип «єдиної істини» - оперативний вихідний код при моделюванні;

– комунікаційний випробувальний стенд і лабораторне розширення - Інтерфейс System-in-the-Loop дозволяє розширити випробувальний стенд зв'язку за допомогою імітованого обладнання. Справжнє обладнання, програмне забезпечення та користувачі можуть взаємодіяти з кількома віртуальними пристроями як частина імітаційної моделі, що потенційно уникає потреби в дорогому тестовому лабораторії.

OPNET Modeler - це програма з графічним інтерфейсом ПК, яка дозволяє графічно побудувати комунікаційну мережу в тривірневій ієрархії:

1. Модель мережі: складається з вузлів, посилянь і підмереж
2. Модель вузла: складається з будівельних блоків вузлів - процесорів, черг, приймачів та інтерфейсів між ними
3. Модель процесу: складається з діаграми кінцевого автомата, блоків коду C/C++, процедур ядра OPNET

Атрибут Reference Bandwidth використовується для визначення ціни каналу, яка враховується при моделюванні процесу прийняття рішення про маршрутизацію пакетів. Модель мережі в OPNet показана на рисунку 3.5.

На відміну від розробленої програми, пакет OPNet використовує число 1010 як основу для розрахунку ціни каналів. Ця різниця не повинна впливати на результат моделювання, оскільки співвідношення між цінами каналів у даній моделі не зміниться.

Щоб знайти оптимальний (з точки зору швидкості передачі даних) шлях між вузлами «вузол_0» і «вузол_6», які відповідають вершинам 1 і 7 графіка,

показаного на малюнку 3.2, необхідно визначити напрямки трафіку (попит на трафік) від вузла «вузол_0». « до вузла «Вузол_6».

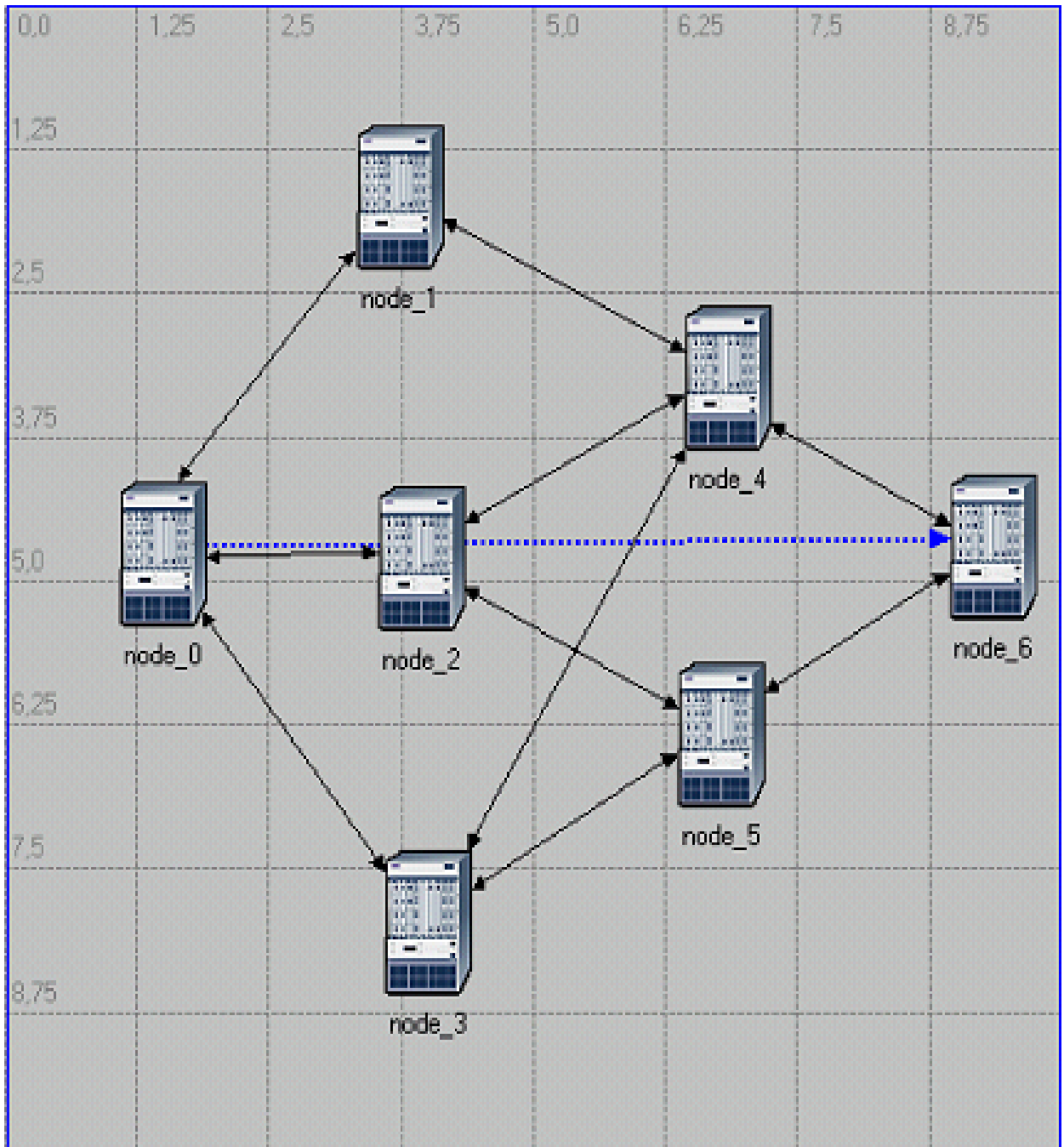


Рисунок 3.5 - Модель мережі в пакеті OPNet

Після початку моделювання було отримано наступний результат:

Шлях №1

node_0 -> node_6 Campus Network.node_0

Campus Network.node_0 <-> node_1 Campus Network.node_1

Campus Network.node_1 <-> node_4 Campus Network.node_4

Campus Network.node_4 <-> node_6 Campus Network.node_6

Для пари вузлів «вузол_0» і «вузол_6» обрано шлях вузол_0 -> вузол_1-> вузол_4 -> вузол_6, який збігається з шляхом, отриманим за допомогою розробленої програми.

У ситуації, коли маршрутизатор працює одночасно з декількома різними протоколами маршрутизації, для вибору маршрутів використовується додатковий критерій оптимальності – так звана «адміністративна відстань» (administrative distance), яка характеризує ступінь надійності отриманого маршруту. Адміністративна відстань — це числовий параметр, який може приймати значення від 0 до 255. Ці значення призначаються різним протоколам маршрутизації, а протоколи, від яких маршрути отримують найбільшу надійність, мають менші значення адміністративної відстані. Значення 0, 1 і 255 грають окрему роль. Адміністративна відстань вважається нульовою для маршрутів, кінцева адреса яких належить інтерфейсу, який безпосередньо підключений до цього вузла мережі. Такі маршрути є найнадійнішими, оскільки маршрутизатор завжди має найновішу інформацію про продуктивність каналів, які з'єднують його з іншими вузлами мережі. Адміністративна відстань, що дорівнює одиниці, вказує на статичні маршрути — ті, які вручну введені адміністратором до таблиці маршрутизації. Значення «255» використовується для маршрутів, походження яких невідоме. Такі маршрути маршрутизатор взагалі не враховує при виборі шляху для інформаційних пакетів, навіть якщо такий маршрут є єдиним відомим. Стандартні значення адміністративної відстані для деяких інших протоколів наведені в таблиці 3.1. Значення «255»

використовується для маршрутів, походження яких невідоме. Такі маршрути маршрутизатор взагалі не враховує при виборі шляху для інформаційних пакетів, навіть якщо такий маршрут є єдиним відомим. Стандартні значення адміністративної відстані для деяких інших протоколів наведені в таблиці 3.1. Значення «255» використовується для маршрутів, походження яких невідоме. Такі маршрути маршрутизатор взагалі не враховує при виборі шляху для інформаційних пакетів, навіть якщо такий маршрут є єдиним відомим. Стандартні значення адміністративної відстані для деяких інших протоколів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Адміністративні відстані протоколів

Назва протоколу	Значення відстань
Загальний маршрут EIGRP	5
BGP, який працює поза автономною системою	20
EIGRP, який працює в автономній системі	90
IGRP	100
OSPF	110
IS-IS	115
RIP	120
EGP	140
ODR	160
EIGRP, який працює поза автономною системою	170
BGP, який працює в автономній системі	200

Причиною відмінності в надійності маршрутів є особливості організації різних протоколів маршрутизації, а не їх недоліки. Наприклад, маршрути, отримані за допомогою протоколу Routing Information Protocol, вважаються менш надійними, ніж маршрути, отримані OSPF, оскільки RIP вибирає

маршрути, використовуючи кількість вузлів на шляху як критерій оптимальності, не враховуючи пропускну здатність каналів між вузлами. .

Адміністративна відстань протоколів не є фіксованим параметром, і адміністратор мережі може змінити його, якщо ви хочете віддати перевагу маршрутам одного або кількох протоколів. При побудові таблиці маршрутизації адміністративна відстань вважається більш важливим критерієм, ніж усі інші. Так, маршрутизатор відразу виключає з розгляду маршрути невідомого походження. Критерії, специфічні для використовуваного протоколу маршрутизації (наприклад, пропускну здатність каналу), використовуються для подальшого аналізу та вибору оптимального маршруту. Таким чином, запропонований метод моделювання процесу маршрутизації на основі динамічного програмування дозволяє вирішити багатокритеріальну задачу (пропускну здатність і надійність) і вибрати оптимальний шлях для кожного вхідного пакета.

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті розглядається проблема багатофакторної оптимізації просторово-часової структури телекомунікаційної мережі за критеріями пропускної здатності та надійності, а також практична реалізація програмного планування перехідних мереж, що забезпечує техніко-економічну ефективність ТМ.

Були отримані наступні практичні результати:

1. Висвітлено тенденції планування та оптимізації ТМ та показано, що існуючі методи планування не повністю відповідають реальному стану мереж, є застарілими та потребують уточнення. Показано, що у зв'язку зі зміною ситуації в сфері інфокомунікації акценти планування змістилися і планування локальних мереж стало більш важливим, на відміну від попереднього підходу, де більше уваги приділялося магістральним мережам.

2. Аналіз впливу різних факторів на процес еволюції ТМ та їх співвідношення дозволив виділити найбільш значущі з них та формалізувати їх, що дозволило створити модель просторово-часової структури ТМ.

3. Запропоновано аналітичні моделі, що описують вимоги до підключення нових користувачів для різних умов роботи ТМ.

Побудовано модель представлення класу послуг, яка чітко відображає параметри сервісів певного класу і є гнучкою з точки зору розширюваності. Також пропонується рівнева модель надання послуг для опису взаємодії типу послуги, методу кодування сигналу, режиму передачі інформації, технології мережі доступу та середовища передачі інформації. Запропоновані моделі дозволяють формалізувати завдання окремих служб автоматизувати процес планування ТМ, що призводить до зниження витрат праці та підвищення точності.

5. Сформульована математична абстракція, яка дозволяє формалізувати дослідження процесу модернізації ТМ разом у часі та просторі.

Для опису мережі в часі та просторі пропонується використовувати п'ять груп параметрів: часовий період дослідження, топологічна структура досліджуваної мережі, вимоги до обслуговування та збільшення пропускної здатності мережі, техніко-економічні параметри еволюції мережі. Для кожної групи параметрів, які утворюють загальну просторово-часову структуру, будуються математичні абстракції.

6. Розроблена алгоритмічна процедура реалізована в програмному комплексі, що виконує процес оптимізації еволюції мережі. Для програмного комплексу розроблено рівневі та об'єктні моделі для адаптації до різноманітних прикладних завдань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Довгий С.О., Савченко О.Я., Воробієнко П.П. та ін. Сучасні телекомунікації: мережі, технології, економіка, управління, регулювання / За ред. С.О. Довгого. – К.: Український Видатничий Центр, 2002. – 520 с.
2. Тененбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. – СПб. Питер. 2005. – 992 с.
3. Рослякв А.В., Ваняшин С.В., Самсонов М.Ю. и др. Сети следующего поколения NGN / Под ред. А.В. Рослякова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 424 с.
4. Величко В.В., Катунин Г.П., Шувалов В.П. Основы инфокоммуникационных технологий. Учебное пособие для вузов/Под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 712 с.
5. Величко В.В., Субботин Е.А., Шувалов В.П., Ярославцев А.Ф. Телекоммуникационные сети и системы. Учебное пособие. Том 3. – Мультисервисные сети/Под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с.
6. Иртегов Д.В. Введение в сетевые технологии. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 560 с.
7. Довгий С.А. , Копейка О. В., Поленок С. П., Стрижак А. Е. Новые технологии в телекоммуникации: Планирование сервисных пакетов Интернет-услуг. Методика бизнес-планирования / Под ред. С.А. Довгого. – К.: Укртелеком, 2001. – 240 с.
8. Горностаев Ю.М. Перспективные рынки мобильной связи. – М.: Радио и бизнес, 2000. 3. Семенов А.Б. Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов. М.: – ДМК Прогресс; М.: Компания АйТи. 2003. – 416 с.
9. Назаров А.Н., Симонов М.В. АТМ: технология высокоскоростных сетей. – М.: Эко-Трендз, 1999. – 252 с.

10. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 148 с.
11. Убайдулаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 267 с.
12. Денисьева О.М., Мирошников Д.Г. Средства связи для последней мили. – М.: Эко-Трендз, 1999. – 146 с.
13. Кримінальний процесуальний кодекс України : наук.-практ. коментар: у 2 т. / О. М. Бандурка, Є. М. Блажівський, Є. П. Бурдаль та ін. ; за заг. ред. В.Я. Тація. Харків : Право, 2012. Т. 1. 768 с.
14. Про оперативно-розшукову діяльність : Закон України. Відомості Верховної Ради. 1992. № 22. Ст. 303.
15. Про телекомунікації : Закон України. Відомості Верховної Ради України. 2004. № 12. Ст. 155.
16. Кримінальний процесуальний кодекс України : наук.-практ. коментар / за заг. ред. В. Г. Гончаренко, В. Т. Нора, М. Є. Шумило. Київ : Юстініан, 2012. 1328 с.
17. Засоби і системи зв'язку ОВС : навч. посіб. / М. В. Кобець, Е. В. Ланевський, О. В. Яковенко. Київ : НАВСУ, 2004. 83 с.
18. Comer D. Internet working with TCP/IP / D.E. Comer. – Vol. 1, 4th ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2000.2. Microsoft TCP/IP: учебный курс. – М., 1999. – 680 с.
19. Таненбаум Е. Комп'ютерні мережі: пер. с англ. / Е. Таненбаум. – СПб.: Питер, 2002. – 848 с.
20. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи та практичне застосування / Б. Скляр. – М.: Видавничий дім "Ві-льямс", 2003. – 215 с.
21. Метод управління таймером повторної передачі в інформаційних мережах, що працюють згідно протоколом TCP / К.О. Польщиков, О.О. Лаврут, М.М. Александров, В.М. Власик // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – Вип. 6 (25). – С. 38-45.

22. Могилевич Д.І. Показники якості та надійності функціонування мереж зв'язку спеціального призначення / Д.І. Могилевич // Доповіді та тези доповідей VII-го науково-практичного семінару “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій (24 жовтня 2013 року). – К., 2013. – С. 27-28.

23. Ромащенко Р.А. Методика управління потоками при використанні у протоколі TCP методу ковзаючого вікна змінного розміру / Р.А. Ромащенко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2012. – № 3 (15). – С. 40-45.

24. Пучков О.О. Розрахунок імовірності передачі кадру мережею АТМ при використанні методу ковзного вікна / О.О. Пучков, С.П. Колачов, Р.А. Ромащенко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2011. – Вип. 1(27). – С. 188-190.

25. Herasimov S. Synthesis method of the optimum structure of the procedure for the control of the technical status of complex systems and complexes / S. Herasimov, O. Timochko, S. Khmelevskiy // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – Х.: ХНУПС, 2017. – Вип. 4 (53). – С. 148-152.

26. Clarke F. Functional analysis, Calculus of Variations and Optimal Control [Text] / F. Clarke. – New York: Springer, 2013. – 606 p.

27. Testing Signals for Electronics: Criteria for Synthesis / S. Herasimov, V. Pavlii, O. Tymoshchuk, M.Yu. Yakovlev, D.Ye. Khaustov, Ye. Ryzhov, L. Sakovych, Yu.A. Nastishin // Journal of Electronic Testing. – June 2019, Vol. 35, Issues 148. – P. 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10836-019-05798-9>.

28. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский, М.П. Демин. – М.: Радио и связь, 1994. – 481 с.

29. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.