

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему: **“МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕГМЕНТУ МІСЬКОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ”**

Виконала: студентка 6 курсу, групи ТСДМ-61
спеціальності

172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Колодяжна А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Горбенко В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(прізвище та ініціали)

Київ - 2019

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Телекомунікаційних систем та мереж

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

телекомунікаційних систем та мереж

В.Ф. Заїка

“ ”

_____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Колодяжній Анастасії Василівні

1. Тема роботи: “Методи підвищення ефективності функціонування сегменту міської оптичної мережі”,

керівник роботи Горбенко Володимир Михайлович, к.в.н., доцент,
затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.11.2019 №518.

2. Строк подання студенткою роботи 20.12.2019 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Принципи побудови мереж міського масштабу.
2. Розширення функціональності архітектури PON.
3. Алгоритм визначення оптимальної топології зіркоподібної PON.
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз сучасного стану мереж зв'язку міського масштабу.
2. Метод розширення функціональності деревовидної архітектури PON.
3. Математична модель процесу маршрутизації сигналів в цифрових мережах з урахуванням збурень.
4. Обчислювальний експеримент за визначенням оптимальної топологічної схеми цифрової мережі.

5. Перелік графічного матеріалу (назва слайдів презентації):

1. Мета роботи;
2. Функціональна схема взаємодії мереж типу WAN, MAN і LAN;
3. Базові топології побудови мереж міського масштабу 1;
4. Базові топології побудови мереж міського масштабу 2;
5. Схема з'єднання абонентської частини пасивної оптичної мережі;
6. Розширення функціональності деревовидної архітектури PON із застосуванням зіркоподібного розгалужувача;
7. Математична модель взаємодії абонентських вузлів;
8. Алгоритм визначення оптимальної топології багатодоменого абонентського сегменту зіркоподібної PON;
9. Висновки.

6. Дата видачі завдання 11.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	27.09.19	Викон.
2.	Аналіз сучасного стану мереж зв'язку міського масштабу	15.10.19	Викон.
3.	Метод розширення функціональності деревовидної архітектури PON	31.10.19	Викон.
4.	Математична модель процесу маршрутизації сигналів в цифрових мережах з урахуванням збурень	15.11.19	Викон.
5.	Обчислювальний експеримент за визначенням оптимальної топологічної схеми цифрової мережі	29.11.19	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	10.12.19	Викон.
7.	Розробка презентації	18.12.19	Викон.

Студентка

Колодяжна А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Горбенко В.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської кваліфікаційної роботи: 75 сторінок, 34 рисунки, 36 джерел.

Об'єкт дослідження - теоретичні, методичні та практичні питання підвищення ефективності функціонування мереж типу PON з використанням повністю оптичних рішень.

Предмет дослідження - волоконно-оптичні мережі, використовувані для реалізації абонентських закінчень.

Мета роботи - дослідити методи підвищення ефективності функціонування сегменту міської оптичної мережі.

Методи дослідження - методи теорії інформації; методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль; методи комп'ютерного моделювання.

В роботі проведено аналіз сучасного стану ВОСП міського масштабу і тенденції їх розвитку. Розглянута структура і принципи побудови мереж міського масштабу - із застосуванням багатоканальних систем SDH, WDM, Metro Ethernet, їх базові топологічні схеми. Показано, що перспективним напрямом є передача «апаратних» функцій від електронних пристроїв до оптичних, а також подальше продовження «оптики» у бік абонента включаючи не лише фізичну лінію, але і логіку обробки сигналу.

Представлений підхід до розширення функціональності мереж типу PON, заснований на розвантаженні центрального вузла, для випадку взаємодії абонентів сегменту між собою.

Проаналізовано підхід до збільшення кількості каналів на абонентській частині мережі «PON-зірка». Запропоновано використовувати схему або на основі повністю оптичних комутаторів, або із застосуванням OTDM-мультиплексорів.

Розроблено алгоритм визначення оптимальної топології багатодоменого абонентського сегменту зіркоподібної PON.

METROPOLITAN AREA NETWORKS, WORLD AREA NETWORKS, ВОСП, SDH, WDM, METRO ETHERNET, PON-ЗІРКА, МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МАСШТАБУВАННЯ, ТОПОЛОГІЯ, АЛГОРИТМ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ МІСЬКОГО МАСШТАБУ	12
1.1 . Сучасний підхід до побудови телекомунікаційних систем міського масштабу.....	12
1.2 . Базові технічні та топологічні принципи побудови мереж міського масштабу.....	17
1.3 . Система якості QoS і GoS і працездатність ВОСП.....	21
2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СИГНАЛІВ В ЦИФРОВИХ МЕРЕЖАХ З УРАХУВАННЯМ ЗБУРЕНЬ	24
2.1 . Методи збільшення кількості каналів пасивної оптичної мережі	24
2.2 . Аналіз сучасних підходів до задачі маршрутизації цифрових сигналів .	30
2.3 . Завдання статистичного моделювання процесу альтернативної маршрутизації пакетів.....	32
3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ЗА ВИЗНАЧЕННЯМ ОПТИМАЛЬНОЇ ТОПОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ЦИФРОВОЇ МЕРЕЖІ	38
3.1 . Мета і методика проведення обчислювального експерименту.....	38
3.2 . Методика статистичного моделювання цифрових сигналів	42
3.3 . Методика статистичного чисельного моделювання впливу спотворюючих факторів на процес маршрутизації цифрових сигналів	49
3.4 . Результати обчислювального експерименту по знаходженню оптимального сегмента для зіркоподібної PON	54
ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AON	All Optical Networks (повністю оптичні мережі)
ATM	Asynchronous Transfer Mode (асинхронна система передачі)
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier (легований ербієм волоконний підсилювач)
PE	Probability error (ймовірність помилки)
GoS	Grade of Service (якість обслуговування)
LAN	Local Area Networks (локальна мережа)
MAN	Metropolitan Area Networks (мережа міського масштабу)
MPLS	Multi Protocol Label Switching (мультипротокольна комутація по мітках)
NGN	Next General Networks (мережі наступного покоління)
NES	Number of error second (кількість секунд з помилками)
NMES	Number of more error seconds (кількість сильно уражених секунд)
PON	Passive Optical Networks (пасивна оптична мережа)
QoS	Quality of Service (якість послуг)
SDH	Synchronous Digital Hierarchy (синхронна цифрова ієрархія)
TDM	Time Division Multiplexing (мультиплексування з поділом за часом)
WAN	World Area Networks (глобальна мережа)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (спектральне ущільнення каналів)
ВОЛП	Волоконно-оптична лінія передачі
ВОСП	Волоконно-оптична система передачі
ДЧІ	Девіація часового інтервалу
КТБ	Кабельне телебачення
БТС	Багатоканальна телекомунікаційна система
НТД	Нормативно-технічна документація
ОВ	Оптоволокно
ТМЗК	Телефонні мережі загального користування

ВСТУП

Актуальність роботи. На даний момент областю, що найбільш динамічно розвивається в сфері телекомунікаційних систем є мережі міського масштабу [1] або Metropolitan Area Networks (MAN), що представляють як міські телефонні мережі загального користування (ТМЗК), так відомчі та корпоративні системи передач. Останні розвинулися з локальних мереж підприємств (Local Area Networks - LAN) з появою необхідності з'єднання віддалених корпусів, а також забезпечення виходу в Інтернет і з часом щільно злилися з ТМЗК. Системи передачі типу MAN володіють такими характерними властивостями, як:

- досить значною зоною покриття з великою кількістю вузлів у порівнянні з LAN, розташованих, як правило, в густо населеній території з платоспроможним населенням, що дає можливість вводити нові послуги і сервіси;

- помірним за масштабом парком обладнання і ще не занадто протяжними, в порівнянні з глобальною мережею (World Area Networks - WAN), лінійні споруди, що дозволяє гнучко адмініструвати мережу в рамках єдиного оператора або невеликої групи корпоративних операторів.

Все це дозволяє активно впроваджувати концепцію мереж наступного покоління (Next General Networks - NGN) [2], частково розвиваючи мережу по області покриття і більшою мірою - по широті і різноманітності надання послуг, адаптуючи в тому числі імпортовані послуги в Україні, використовуючи при цьому мережу як полігон.

Але через різноманітність апаратного парку, що пов'язано з історією появи MAN, розходженням стандартів систем передач, що використовуються на тих чи інших сегментах мережі, можливо, різними підходами операторів до створення центральної (багатоканальної) частини або ядра мережі, розглянутий тип мереж, як правило, володіє точною гетерогенністю. Це далеко не завжди дозволяє їх оптимально експлуатувати з точки зору таких широко поширених критеріїв, як «якість - ціна» і «питома вартість передачі», не кажучи вже про вироблення шляху ефективної модернізації.

У відомій літературі [1, 29 - 34] вельми мало розглядаються питання вирішення мережевих завдань із залученням повністю оптичних методів і ефектів, як підвищують ефективність управління мережею, так і дозволяють розширити адресацію системи з управління. Нові технічні завдання, поставлені промисловістю перед системами передачі по збільшенню швидкості, обсягів переданої інформації, розширенню областей технічних додатків і ефективності, призводять до необхідності моделювання, подальшої оптимізації та перегляду принципів проектування, управління і контролю мережею. У зв'язку з цим побудова нових інженерних методик проектування і розрахунку ВОСП, а також розробка методик оптимізації процесів взаємодії мережевих елементів для MAN, принципів їх побудови та модернізації є актуальною технічною задачею, а створення методів моделювання розглянутих процесів з урахуванням технічної експлуатації MAN, властивостей обладнання та впливають чинників - перспективним науковим напрямком. Магістерська робота присвячена дослідженню нових математичних моделей, методик розрахунку і схемотехнічних моделей для волоконно-оптичних мереж міського масштабу підвищують ефективність їх роботи.

Основні результати магістерської роботи отримані з використанням положень теорії графів, випадкових процесів, диференціальних рівнянь. Застосовані методи математичного моделювання, у тому числі комп'ютерного. Проведено обчислювальний експеримент з використанням результатів експлуатації діючої телекомунікаційної системи.

Мета роботи полягає в дослідженні методів підвищення ефективності функціонування сегменту міської оптичної мережі.

Об'єктом дослідження є волоконно-оптичні мережі, використовувані для реалізації абонентських закінчень.

Предмет дослідження: теоретичні та практичні питання підвищення ефективності функціонування мереж типу PON з використанням повністю оптичних рішень.

Методи досліджень. Для досягнення поставлених цілей в магістерській роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів; методи теорії

розповсюдження електромагнітних хвиль; методи комп'ютерного моделювання; математичної статистики.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати магістерської атестаційної роботи доповідалися на конференціях Державного університету телекомунікацій та опубліковано в науковому журналі “Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку”.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ МІСЬКОГО МАСШТАБУ

1.1 . Сучасний підхід до побудови телекомунікаційних систем міського масштабу

Типова схема сучасної системи зв'язку типу MAN, що використовує оптичне волокно, показана на рис. 1.1. Ці мережі сформувалися з міських ТМЗК, традиційно призначених для забезпечення зв'язком міст, а також в результаті приєднання до них (злиття з ними) корпоративних і відомчих мереж великих (містоутворюючих) підприємств. Між MAN різних міст встановлено взаємодію, що й утворює WAN національного масштабу. Через те, що традиційно як ТМЗК, так і відомчі мережі будувалися як багатоканальні, структуру MAN також можна представити як багатоканальне ядро і малоканальну периферію. До периферійних складових можна віднести і малі (локальні) мережі підприємств.

Також як і для будь-якої багатоканальної телекомунікаційної системи (БТС), MAN представляє сукупність кінцевих і ущільнюючих пристроїв, ліній зв'язку, вузлів комутації, маршрутизаторів і ін. Конкретний склад обладнання та принцип фізичної передачі (оптика або мідь) багато в чому залежать від того, з якої мережі склався даний сегмент MAN. Поширеною в Україні TDM-технологією, що використовується більшістю операторів в недалекому минулому і надавачами базові послуги ТМЗК, є система синхронної передачі [1, 16, 17]. В даний час вже всі магістральні (багатоканальні) сегменти синхронних мереж засновані на стандарті SDH, а канали плезіохронної ієрархії (PDH) використовуються як службові, або для «останньої милі», у тому числі для організації xDSL - закінчень [31, 36]. Звідси очевидно, що магістральна частина SDH - сегмента MAN заснована на мультиплексах SDH, що працюють, як правило, на швидкостях ~ 600 Мбіт/с (рівень STM- 4) та/або $\sim 2,5$ Гбіт/с (рівень STM-16), як ліній передачі між ними використовуються волоконно-оптичні лінії передачі (ВОЛП).

Периферійна частина під'єднується по каналам PDH (потік E1 і xDSL - за-

кінчення, рідше E3), або по каналах Ethernet до 100 Мбіт/с. У цьому випадку периферійна частина в переважній більшості заснована на мідних лініях. Оптика на SDH - сегментах MAN використовується лише на магістралі в з'єднанні «точка - точка» між мультиплексорами; загальна схема SDH - сегмента, як правило, кільцева. Таку ж будову мають і багато сегментів MAN, які «виросли» з відомчих мереж великих підприємств - наприклад, підприємств паливно-енергетичного комплексу. З розвитком мереж кабельного телебачення (КТБ), комп'ютерних та обчислювальних мереж отримав суттєвий розвиток стандарт Ethernet, істотно переїс рівень LAN і вийшов на рівень сегментів MAN [16].

Якщо на початковому етапі дані організації орендували канали у великих операторів, які використовують SDH, отже, завдання зв'язку вирішувалася шляхом використання Ethernet поверх SDH, то нині вже експлуатується велика кількість ліній, за якими працює транспортний Ethernet через те, що «мідний» Ethernet в транспортному варіанті може передаватися на набагато більш короткі відстані, ніж «оптичний» Ethernet, логічна структура «мідного» Ethernet сильно ускладнює використання його у вигляді транспортного, все це сприяло розвитку ВОЛП для систем з асинхронним (статистичними) мультиплексуванням, таких, як Ethernet, але так як Ethernet - це спочатку (по суті його розробки для комп'ютерних систем [38]) одноканальна система, а використання міських ВОЛП для одноканальної передачі істотно не вигідно, то транспортний Ethernet став розвиватися в наступних напрямках:

- 1) транспортну передачу Ethernet по ВОЛП проводити на різних довжинах хвиль, переданих разом за єдиним оптоволоконном (ОВ), використовуючи стандарти хвильового мультиплексування - WDM, CWDM та DWDM [19];

- 2) виконувати ширококомунікаційне завдання, використовуючи деревоутворюючу топологію «точка - багатоточка» і оптичний спосіб простого розділення сигналів між абонентами за допомогою пасивних розгалужувачів;

- 3) доопрацювати стандарт Ethernet (як склад сигналів, так і склад обладнання), ввівши в нього операцію об'єднання декількох низькошвидкісних потоків в єдиний високошвидкісний так, що б забезпечувати традиційне TDM- мультиплек-

сування, подібне використовуваному в SDH.

Перший напрямок призвів до того, що на основі спектрального ущільнення WDM початкову мережу стали розділяти на багато підмереж, де кожна з них працює незалежно на власній довжині хвилі, рис. 1.2, і де за перенаправлення мережевого трафіку відповідав пристрій, що називається міст [28]. Цей принцип дозволяє не тільки поєднувати багато завдань, роблячи мережу зрештою мультисервісної, а й забезпечити ефективну передачу зростаючого трафіку за рахунок використання багатьох паралельних каналів. Отже, виникла задача маршрутизації трафіку. Зв'язок між підмережами, див. рис. 1.2, здійснювався шляхом логічного присвоєння моста обом підмережам. Тут важливим завданням був оптимальний вибір підмереж виходячи з реальної фізичної топології мережі і, відповідно, розподіл мостів, що пов'язано з апаратною реалізацією і в кінцевому підсумку - з величиною капітальних витрат. Тут критерієм оптимальності був мінімум перехресного трафіку, що проходить по мосту. Останнє необхідно для зменшення перевантажень мостів з утворенням великих черг на них, а також для економії мережевих ресурсів: передача через міст використовує в два рази більше ресурсів, ніж усередині підмережі [16, 17], вже хоча б щодо задіяння кількості та номерів довжин хвиль.

Отримані таким чином логічні підмережі, які в загальному випадку не обмежуються за видами застосовуваних топологій, можуть у свою чергу також бути розбиті на частини, що в певних випадках скорочує час управління підмережами і забезпечить можливість їх розширення в майбутньому.

У результаті робіт за другим напрямом утвердилися стандарти PON [10, 11], застосовувані спочатку головним чином для роздачі сигналу КТБ, а сьогодні - для повноцінних мультисервісних мереж доступу використовуються наступні специфікації PON (стандарт G.983.x): передача сигналів ATM/SDH - APON (ATM PON, G.983.1); осередків Ethernet - EPON (Ethernet PON або сигналів SDH до 622 Мбіт/с, G.983.2); широкосмугових сигналів – BPON (broadband PON, G.983.3) і GPON (Gigabit PON або сигналів SDH на швидкості передачі від 622 Мбіт/с до 2,5 Гбіт/с, G.984.1...G.984.3). На абонентському вузлі можуть використовуватися ін-

терфейси: E1, 10/100Base -TX, відео (PAL, SDI, DVB ASI), телеметрія RS- 232. Інтерфейси з боку магістралі - SDH (155/622 Мбіт/с) або Ethernet (10/100/1000 Мбіт/с). Крім цього для додаткового ущільнення низхідних і висхідних потоків реалізований режим WDM (CWDM, DWDM), рис. 1.3. Спадний потік найчастіше передається на довжині хвилі 1550 нм і має швидкість в межах 2,5 Гбіт/с в сумі для всіх абонентів, що відповідає рівню STM-16. Висхідні потоки йдуть на довжині хвилі 1310 нм з використанням, як правило, технології Ethernet. У разі використання DWDM, рис. 1.4, як спадні, так і висхідні потоки передаються з ущільненням по довжині хвилі в різних вікнах прозорості. Але при цьому бітова швидкість в кожному з ущільнених по довжині хвилі каналів обмежується до 622 Мбіт/с.

Через те, що в PON міцно прижилося TDM-ущільнення, що виконується електронним способом, витала раніше ідея про використання даних мереж для реалізації програм FTTC (Fiber To The Curb - ОВ доходить до оптичного розподільного вузла, обслуговуючого декілька будівель), FTTB (Fiber To The Building - ОВ доходить до будівлі), і особливо FTTH (Fiber To The Home - ОВ до будинку) [1] виявилася для українських мереж неспроможною. PON в даний час неминуче мають електронне закінчення. Відмова від TDM-ущільнення і використання тільки ущільнення по довжинах хвиль є недостатнім за кількістю абонентів на одну гілку PON. Іншими словами, PON може бути пасивною повністю оптичною мережею доступу, що працює за програмою FTTH, але вартість підключення абонента буде дуже високою, що не ефективно для України.

У результаті робіт з третього напрямку виникла багатоканальна система, що увібрала в себе позитивні сторони технології з випадковим доступом до середовища, тобто Ethernet, і багатоканальної TDM-передачі, тобто SDH, іменована Metro Ethernet. Через те, що системи SDH і PDH комутують трибутарні (висхідні) потоки незалежно від їх заповнення, передаючи при відсутності сигналу користувача «порожні місця» і примушуючи тим самим чекати якогось іншого абонента, що вимагає в поточний момент широкої смуги пропускання, втрачають ефективність і поступаються місцем технології з випадковим доступом до середовища.

Але, як вже обговорювалося вище, класичний Ethernet є одноканальним, і для того, що б стати транспортним, зажадав WDM - ущільнення, або навіть використовує SDH. Якщо не брати до уваги останнє, то системи xWDM не можуть ефективно замінити досягнутий на сьогоднішній день рівень TDM- ущільнення. Як відомо [1, 30], система DWDM надає в даний час не більше 160 каналів, що не забезпечить в «чистому» вигляді потреби в багатоканальній передачі навіть невелику корпоративну мережу, не кажучи вже про міської мережі.

Система Metro Ethernet (ME) реалізована в такий спосіб. Поступаючі на вхід мультиплексуючого пристрою трибутарні потоки Ethernet на швидкостях до 100 Мбіт/с мультиплексуються подібно до алгоритму групоутворення, реалізованому в SDH, і на виході виходить груповий сигнал, що містить всі їх тайм-слоти, що надійшли в даний момент, але на більш високою бітової швидкості, наприклад, 1 або 10 Гбіт/с. Але, на відміну від SDH, якщо в якомусь з вхідних потоків нічого немає, то його місце в загальній (груповий) комірці займається іншим сигналом, пакети якого стоять в черзі на вході ME-мультиплексора. Це і є принцип випадкового доступу до середовища - передає той, хто хоче передавати; а хто мовчить - той не займає смуги пропускання.

Система Metro Ethernet в даний час є досить перспективною, до того ж вона не прив'язана до оптики - цілком може працювати і по міді. Але, з іншого боку, наявність на кожному кроці «розумних» перетворюючих пристроїв істотно ускладнює впровадження повністю оптичних технологій і реалізацію програми FTTH. Крім цього використання TDM-ущільнення, навіть і з режимом випадкового доступу до середовища, вимагає синхронізації всіх поступаючих Ethernet-осередків для ущільнення їх в груповий єдиний ME-модуль.

Звідси випливає, що інтелектуальне наповнення мережі Metro Ethernet істотно більш складне, ніж традиційної Ethernet. Це збільшує тривалість логічної обробки повідомлень і призводить до переповнення процесами управління. Для зниження цього негативного фактора активно використовується режим мультипротокольної комутації по мітках (Multi Protocol Label Switching - MPLS, [42]). У цьому випадку абоненту (групі абонентів) присвоюється мітка (у вигляді елект-

ронного коду), що додається в Ethernet-посилку, яка забезпечує проходження по ядру мережі цієї посилки без детального аналізу адреси одержувача, тобто з логічної точки зору швидше. Передбачається, що в перспективі можуть бути впроваджені ще три принципово відрізняючихся види мультипротокольної комутації або Generalized MPLS (GMPLS): комутація по довжині хвилі або MPLS, коли міткою є довжина хвилі сигналу і аналізується взагалі на фізичному рівні. Щось подібне представлено на рис. 1.2. Далі - комутація по тайм-слотах в SDH, коли тайм-слот використовується не задля ущільнення, а для незалежного від протоколу взаємодії абонентів; і MPLS, коли міткою є конкретний світловод (його номер) в кабелі. Або те ж саме - відбувається оптична (або повністю оптична) комутація світловодів, з'єднуючи при цьому потрібні напрямки.

1.2 . Базові технічні та топологічні принципи побудови мереж міського масштабу

Всі телекомунікаційні системи, також і MAN, будуються за структурою рівнів, узагальнено представленою на рис. 1.5. Тут під фізичною структурою розуміються базові принципи організації мережі - оптика або мідь, топологія, сюди ж належить можливість/неможливість WDM - ущільнення, а також принцип лінійного кодування, виправлення бітових помилок, регенерація сигналу і т.д. [31]. Логічну структуру (укрупнено) складають завдання транспортування сигналів (нижче) і управління цим транспортуванням (вище), тобто комутація (трохи нижче) і маршрутизація (трохи вище). Відповідно прийняті системи стандартів - QoS і GoS, що дозволяють оцінювати ефективність роботи мережі.

Але, незважаючи на великі можливості обчислювальних систем і IP- технологій, що використовуються в даний час в телекомунікаціях, логіка управління істотно залежить від нижнього, фізичного, рівня, зокрема, від топологічної схеми і стандарту передачі мережі. Базовий набір топологічних рішень визначає не тільки тип використовуваного станційного обладнання, а й спосіб резервування, а отже, і підхід до службового адміністрування мережі. Для SDH крім топології «точ-

ка-точка», рис. 1.6, використовується «послідовний лінійний ланцюг», рис. 1.7 для забезпечення введення/виведення каналів доступу, і «кільце», рис. 1.8, яке є зручним рішенням для забезпечення резервування. Такі ж топології використовуються і для Metro Ethernet, головним чином тому, що для реалізації даної системи не ставилося завдання побудови нових ВОЛП, а в основному переобладнувалися вже наявні, раніше задіяні під SDH. Такі ж топологічні схеми характерні і для Ethernet, переданого в сусідніх А - каналах.

Для мереж PON дещо інша картина. У багатьох випадках лінії передачі для PON будувалися з «чистого аркуша» організаціями, що переслідують ціль не передачі послуг ТМЗК, а КТБ. Для PON використовуються чотири основні топологічні схеми: «кільце», «точка - точка» або P2P, «дерево з активними вузлами» і «дерево з пасивними вузлами» [31] (рис. 1.9 - рис. 1.12). Але якщо представлені на рис. 1.6 - рис. 1.8 топології забезпечують передачу на всіх розглянутих для них стандартах, то в PON топологія визначає вибір стандарту.

Кільцева топологія позитивно зарекомендувала себе в мережах SDH, так як при побудові магістралі розташування вузлів планується на етапі проектування. Але в PON не можна заздалегідь знати де, коли і скільки абонентських вузлів буде встановлено. При випадковому територіальному і часовому підключенні користувачів кільцева топологія, як правило, перетворюється на сильно поламане кільце з безліччю відгалужень. Підключення нових абонентів здійснюється шляхом розриву кільця і вставки додаткових сегментів.

На практиці часто такі петлі поєднуються в одному кабелі, що призводить до появи кілець, схожих більше на ламану, а також «стислих» кілець (collapsed rings), що значно знижує надійність мережі. Фактично головне перевага кільцевої топології зводиться до мінімуму. Проте, при побудові PON застосовуються кільцеві схеми в тому випадку, коли використовується мережева технологія SDH.

Топологія «точка - точка» або P2P (point to point) (рис. 1.10) не накладає обмежень на використовувану мережеву технологію, може бути реалізована як для будь-якого мережевого стандарту, так і для нестандартних (proprietary) рішень,

наприклад, використовують оптичні модеми. З точки зору безпеки і захисту переданої інформації, при з'єднанні P2P забезпечується максимальна захищеність абонентських вузлів, тому що вони не пов'язані один з одним. Оскільки оптоволокно потрібно прокласти індивідуально до абонента, цей підхід є найбільш дорогим і привабливий в основному для великих абонентів. «Дерево з активними вузлами» (рис. 1.11) - це економічне з точки зору використання волокна рішення, добре вписується в рамки стандартів та Ethernet з відомою ієрархією швидкостей від центрального вузла до абонентів, складової 1000/100/10 Мбіт/с. Проте в кожному вузлі дерева обов'язково повинно знаходитися активний пристрій (стосовно до IP-мереж: комутатор або маршрутизатор), що вимагає індивідуального електроживлення. При створенні повністю оптичних такого роду пристроїв, керованих оптичним сигналом по окремому волокну або в режимі WDM спільно з інформаційними сигналами, дана схема, швидше за все, стане найбільш затребуваною.

Рішення на основі «дерева з пасивним розгалуженням» або топологічної схеми «точка-багатоточка» P2MP (point to multipoint) (рис. 1.12) дозволяє до одного порту центрального вузла підключати цілий волоконно-оптичний сегмент деревовидної архітектури, що охоплює десятки абонентів. При цьому в проміжних вузлах «дерева» встановлюються компактні пасивні оптичні розгалужувачі (сплітери), які не потребують живлення та обслуговування.

PON по рис. 1.11, рис. 1.12 дозволяє економити на кабельній інфраструктурі за рахунок скорочення сумарної протяжності ОВ, так як на ділянці від центрального вузла до розгалужувача використовується всього одне волокно. Але існує й інше джерело економії - скорочення числа передавачів і приймачів (при використанні дуплексних каналів) в центральному вузлі. Тим часом економія другого чинника в деяких випадках виявляється навіть більш істотною.

Згідно з оцінками компанії NTT [31], конфігурація PON з розгалужувачем в центральному офісі в безпосередній близькості до центрального вузла виявляється економічніша, ніж мережа «точка - точка», хоча скорочення довжини оптичного волокна практично немає. Більш того, якщо відстані до абонентів невеликі з урахуванням витрат на експлуатацію (останнім часом це суттєвий фактор), вияв-

ляється, що PON з перехідником в центральному офісі економічніша, ніж PON з перехідником, наближеним до абонентських вузлів.

Детальне знання властивостей і особливостей топологічних схем дозволяє використовувати їх при виконанні управління мережею. Іншими словами – знижувати рівень управління, що, як показує практика експлуатації [32 - 36], істотно прискорює мережеві процеси. Саме на цьому ефекті, тобто ефекті зниження рівня OSI мережі [17], на якому виконується керування, і побудований принцип MPLS. Одним із способів прискорення мережевих процесів є переклад роботи на повністю оптичний або фотонний рівень [1, 30, 33].

Напрямок розвитку інформаційно-телекомунікаційної галузі, як згадувалося вище, є їх міграція до повністю оптичних мереж, включаючи властиві їм методи управління і обробки сигналу. Головною особливістю AON є виконання всіх видів операцій над сигналами в оптичній формі за допомогою використання пасивних оптичних ефектів:

- для реалізації пасивних пристроїв, або оптико-оптичних ефектів;
- для реалізації активних пристроїв керування.

Типова функціональна схема AON в порівнянні з традиційними ВОСП показана на рис. 1.13. Що застосовуються сьогодні пристрої керування оптичними потоками засновані на оптоелектронних ефектах, або використовують механічне пере направлення променя [1, 22, 30]. Повністю оптичні мережі можна поділити по наявності/відсутності активних компонентів управління, якщо необхідно здійснювати комутацію каналів, і за принципами обробки сигналу, заснованим на послідовній або паралельній комутації бітів, рис. 1.14.

З точки зору управління крім іншого, в AON ефективніше буде використовуватися GMPLS, що досить актуально з огляду на те, що в даний час у великих мережах з пакетною комутацією одним з основних «стопорних» місць є переповнення IP-процесами. Це ж призводить до того, що в мережі (сегменті мережі) настає брак ресурсів з управління, що призводить до необхідності суттєвої модернізації.

1.3 . Система якості QoS і GoS і працездатність ВОСП

Згідно з аналізом опублікованих робіт в області телекомунікацій [1, 3 - 5, 9 - 14 та ін.] сучасна тенденція розвитку телекомунікаційних систем спрямована не стільки на фізичне розширення мережі із збільшенням кількості обслуговуваних номерів, скільки на розширення сфери надаваних послуг та збільшення їх різноманітності. Це і призводить до істотного функціональному ускладнення цифрових мереж, а отже, і до підвищення вимог щодо достовірності та надійності передачі, тобто до якості побудови ВОСП. Відповідно до рівнів Моделі взаємодії відкритих систем [17], для системи якості також встановлена відповідна градація. Для верхніх рівнів (прикладного, уявлень, сеансового), схематично об'єднаних в адміністративний і логічний рівень управління на рис. 1.5, використовується поняття про якість надання послуг QoS, для нижніх рівнів (фізичного, каналного, мережевого і транспортного), схематично об'єднаних у фізичний і логічний транспортний на рис. 1.5, це якість обслуговування GoS. Очевидно, що параметри QoS і GoS взаємопов'язані, і, згідно [17], має місце їх взаємодія. Отже, погіршення працездатності системи передачі на нижніх рівнях неминуче призводить до погіршення обслуговування абонентів.

На відміну від QoS, параметри GoS є кількісними характеристиками, визначальними технічну працездатність ВОСП. Вони регламентують значення показників завадостійкості, надійності передачі і величин допустимих часових затримок при передачі повідомлень, при яких виконуються (вважаються задоволеними) якісні користувальницькі характеристики QoS. Причому затримки в передачі повідомлень пов'язані не тільки з завантаженням мережі і неминучим наявністю черг, а й з реальною (кінцевою) працездатністю мережевого обладнання, що приводить до повторної передачі повідомлення про помилку його прийому у адресата. Якщо врахувати, що низька достовірність прийому знову-таки пов'язана з недостатньою завадостійкістю і надійністю мережевих пристроїв, то до незалежних параметрах системи GoS, згідно [23, 31], можна віднести наступні:

- 1) показники завадостійкості передачі, які в основному визначаються вели-

чиною ймовірності бітових помилки (PE), і

2) показники надійності, в основному визначаються ймовірністю безвідмовної роботи (Q).

Якщо величина PE може бути визначена як аналітично [31], так і по результатами вимірювань (застосуванням BER - тестера), то параметр Q неможливо отримати безпосередньо. Отже, адекватна оцінка реальної працездатності мережі, що в кінцевому підсумку визначає стратегію управління мережею та її стратегічне планування, залежить від методик розрахунку низки показників.

Необхідно відзначити, що прийняті в НТД зараз методики визначення показників надійності, по-перше, недостатньо опрацьовані відносно знаходження Q, по-друге, не враховують принципово властивий досліджуваного об'єкта статистичний характер зміни всіх величин.

Наприклад, відома методика з визначення надійності [8, 9] не припускає будь-якого обліку фактичної надійності системи. Тому використання такої методики дозволяє отримати лише поточні результати, що не забезпечують можливість прогнозу працездатності мережі і найбільш ймовірної зміни параметрів GoS, а з ними - і напрямки ефективного планування мережі.

На фактичну працездатність ВОСП, як уже згадувалося вище, істотно впливає апаратно-топологічний пристрій мережі. Зокрема, для мереж міського масштабу з розвиненою топологією змішаного типу і тим самим забезпечує передачу по декількох маршрутах між парою абонентів, є актуальною задача маршрутизації і параметри, що характеризують топологічну структуру. Основними такими параметрами є:

3) відстань (в сегментарних з'єднаннях «точка - точка») між абонентами - відстань прольоту (hop distance) HD, і

4) значення, що характеризує кількість мережевих з'єднань для вузла - ступінь з'єднання вузла (degree of unit connection) DC.

Оптимізація роботи мережі з позиції маршрутизації, як правило, проводиться за критерієм мінімізації міжкінцевих затримок при передачі повідомлень між будь-якими парами абонентів. Якщо для синхронних мереж з комутацією каналів

SDH і PDH в більшості випадків характерно збіг віртуальної і фізичної мережевих архітектур, то для Ethernet (Metro Ethernet) віртуальна топологія може істотно відрізнитися від фізичної. Актуальність цього полягає в незалежній передачі посилки (осередків, повідомлень або пакетів) які можуть транспортуватися по різних маршрутах (найменш завантаженим в даний момент або найбільш працездатним), забезпечуючи найбільш домовлену якість обслуговування в, даному випадку з урахуванням можливої пріоритетності трафіку. Особливо враховуючи той факт, що топологія Metro-мереж цьому сприяє. Причому маршрут може вибиратися як заздалегідь рази і назавжди (задача статичної маршрутизації), так і визначатися в процесі роботи (завдання динамічної маршрутизації) [16]. Тут критерієм оптимізації може служити кількість можливих петель проходження трафіку, для - кількісної оцінки використовується такий параметр, як код маршруту.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ МАРШРУТИЗАЦІЇ СИГНАЛІВ В ЦИФРОВИХ МЕРЕЖАХ З УРАХУВАННЯМ ЗБУРЕНЬ

2.1 . Методи збільшення кількості каналів пасивної оптичної мережі

У попередньому розділі був розвинений підхід, що дозволяє підвищити функціональність мережі на абонентському сегменті. Але зазначений спосіб добре працює, якщо має місце достатність за кількістю ущільнених по довжині хвилі каналів. Необхідно зауважити, що ця обставина далеко не завжди має місце, отже, необхідно розробляти методики, що забезпечують збільшення каналів в такому сегменті.

Збільшити кількість каналів, не вдаючись до використання на мережі електронного TDM-обладнання, можна, знову-таки повернувшись до ідей GMPLS. Одним з варіантів зазначеної технології є комутація оптичних волокон на фізичному рівні MPLS. У розглянутій схемі це може виглядати так, як показано на рис. 2.1. У цьому випадку кожен «абонент» розділяється на два, три і т.д. до M залежно від технічних параметрів комутаторів типу $1 \times M$, використовуваних нижче зіркоподібного розгалужувача спільно з кожним абонентським комплектом [52].

Проте істотним тут постає питання управління цими комутаторами. Згідно [1 - 2, 15 - 18, 22 та ін.], в даний час існує значна кількість перемикачів оптичного сигналу, керованих електричним потенціалом. Але використання подібних пристроїв відразу ж виводить розглянуту мережу з розряду повністю оптичних, зводячи нанівець відомі переваги AON. Отже, комутатор повинен бути повністю оптичним - керуючий сигнал також повинен бути в оптичній формі. Але для того щоб це не призвело до необхідності використання ще одного оптичного каналу в кожному з абонентських напрямків, управління повинне міститися в самому переданому сигналі, або, згідно [1, 30], комутатор повинен бути нереляційним. Не виключено також, що такий комутатор буде найбільш важко реалізованою ланкою в мережевій схемі по рис. 2.1. В даний час на телекомунікаційному ринку відсутні серійно випускаемі моделі подібних пристроїв, останні представлені лише

у вигляді проектів і схемо технічних моделей (див., наприклад, [11, 15]). Причому такі модельні пристрої дозволяють виконувати лише переключення виду 1×2 .

Крім, того, через те, що додаються оптоволоконні лінійні ділянки - сегмент від зіркоподібного розгалуджувача до комутатора, сам комутатор, сегменти від комутатора до абонента, збільшується кількість стикув, а отже - збільшується і відбитий сигнал. Враховуючи той факт, що для передачі низхідного і висхідного потоків передбачається використовувати одну і ту ж довжину хвилі для зменшення кількості потрібних каналів, то відбитий сигнал може змішуватися з передаваним, приводячи до його істотної деградації. Рятуює ситуацію те, що коефіцієнт дзеркального відбиття від стику $\rho_{\text{дзерк}} \ll 1$ і становить 1...4 %. Але відбитий сигнал з'являється не тільки через дзеркальне, а й через інтерференційне відображення [12]. Справа в тому, що короткі сегменти оптоволокна і оптичні пристрої, такі як розгалужувач або комутатор з вбудованим хвилеводним змішувачем, спільно з високою когерентністю переданого випромінювання, що обумовлено бажанням використання якомога більшої кількості ущільнених по довжині хвилі каналів і знизити вплив дисперсії, призводить до появи вираженої багатопроменевої інтерференції в каналі [62]. Якщо передача здійснюється на високій бітовій швидкості, що вимагає коротких імпульсів і порівнянних за тривалістю з виникаючими інтерференційними піками, то дія інтерференції призведе до істотної деградації каналу. Але, навіть не враховуючи останнє, коефіцієнт відбиття від елемента інтерференції (далі - елемента ІФП), налаштованого на мінімум своєї передавальної функції і маючий дзеркала з $\rho_{\text{дзерк}}$, можна представити як

$$\rho_{\text{дзерк}} = 1 - \left(\frac{1 - \rho_{\text{дзерк}}}{1 + \rho_{\text{дзерк}}} \right)^2 = \frac{4\rho_{\text{дзерк}}}{(1 + \rho_{\text{дзерк}})^2} \approx 4\rho_{\text{дзерк}}, \text{ так як } \rho_{\text{дзерк}} \ll 1, \quad (2.1)$$

тобто сумарне відображення від кожного короткого сегмента або пристрою складе порядку (5-6) $\rho_{\text{дзерк}}$ залежно від відсутності/наявності другого стику оптоволоконного сегмента. На багатосегментних лініях відображення може бути все ж дещо менше з огляду на те, що не всі елементи ІФП знаходяться в мінімумі своїх

передавальних функцій. В [12] показано, що якщо допускається вважати інтерферометри незалежними, і з загальної їх кількості S тільки D знаходяться в мінімальному, а F - в деякому середньому стані, що відображає вдвічі менше випромінювання, то амплітуда відбитої хвилі виявиться рівною:

$$\Delta = \frac{4\rho_{\text{дзерк}}}{(1 + \rho_{\text{дзерк}})^2} \times \left(\bar{D} + \frac{\bar{F}}{2} \right), \quad (2.2)$$

де D і F - математичні очікування випадкових величин D і F . Тут (в оптичній лінії) під амплітудою сигналу розуміється значення потужності випромінювання.

Недооблік реального відображення може вивести з ладу функціональні пристрої як приймача, так і передавача. Причому в таких мережах принципово (знову-таки виходячи з процесу їх роботи) неможливо використовувати типові оптичні ізолятори [10], в загальному випадку призначені для придушення відбитої хвилі; так як сигнал передається в обох напрямках.

Взагалі кажучи, багатопроменеві інтерференційні ефекти в коротко-сегментних лініях спільно з висококогерентними пристроями є серйозним спотворюючим фактором. Головною умовою виникнення стійкої інтерференційної картини (ІК) є висока когерентність лазера, тобто мала ширина лінії $\Delta\lambda$ надходить в ІФП випромінювання на довжині хвилі λ_0 (рис. 2.2).

Результуючу ІК в першому наближенні можна розглядати як накладення двох ІК, відповідних довжинам хвиль $\lambda_0 - \Delta\lambda$, і $\lambda_0 + \Delta\lambda$. Якщо при цьому резонанси будуть накладатися один на інший, то контрастність ІК зростає. Навпаки, поява резонансів на різних значеннях набігу фаз інтерферуючих променів δ , відповідних різним довжинам хвиль, призведе до змазування результуючої ІК, а значить - до пропажі ефекту інтерференційного спотворення сигналу. Очевидно, що ІК виявиться повністю розмитою, якщо резонанс на одній довжині хвилі наложиться на мінімум, відповідний другий довжині хвилі з урахуванням значної ширини резонансів, що пов'язано з малим значенням відображення всередині світлової лінії. Тут пропажа ІК - позитивний ефект, що має місце для низькокогерентного випромінювання, притаманного раннім телекомунікаційним системам. Якщо зміна на-

бігу фаз інтерферуючих променів в ІФП в разі збільшення $\Delta\lambda$, має вигляд $|\Delta\delta| = \frac{4\pi n_{cv} l}{\lambda_0^2} \cdot \Delta\lambda$ [29], то ефективна величина $\Delta\lambda$ обернено пропорційна довжині сегмента l .

Якщо для помітного розмиття ІК необхідно: $\Delta\delta = \frac{3}{4}\pi \div \pi$, то отримуємо співвідношення:

$$\Delta\lambda = \frac{C_\delta}{l}, \quad (2.3)$$

де C_δ - константа, що залежить від коефіцієнта заломлення сегмента n_{cv} , значення робочої довжини хвилі λ_0 та прирощення різниці ходу променів $\Delta\delta$, але не залежна від коефіцієнтів відбиття дзеркал елемента ІФП. На рис. 2.3 представлений графік функції (2.3) для типових значень $n_{cv} = 1,48$ і $\lambda_0 = 1,55$ мкм.

Якщо амплітуда відбитої хвилі є малою, що не перевищує 5% від амплітуди сигналу, що пов'язано або з мінімальним віддзеркаленням від стиків, або недостатньою когерентністю випромінювання, то зазначеним ефектом можна знехтувати. У разі появи значного відбитого сигналу, що становить близько 10% від основного, крім перерахованих вище виникаючих негативних факторів, що далеко не завжди виявляються явно помітними, може виникати зупинка в роботі телекомунікаційної системи.

З точки зору такого негативного фактора, як значна відбита хвиля, поряд з порівняно невеликим розширенням функціональності мережі, схемі рис. 2.1 переважніше схема по рис. 2.4. В останньому випадку більший вигравш у кількості каналів можна отримати завдяки використанню замість комутатора, фізично переключаючого світловодні тракти, мультиплексора - демультіплексора, спочатку розділяючого вхідний сигнал в режимі TDM, а потім перенаправляючи його по окремих світловодним каналам [12]. Якщо між пристроєм OTDM і вихідними світловодними трактами «додати» хвилеводний змішувач, подібний використовуваному в зіркоподібному розгалужувачі, (див. рис. 2.1, б) а кожному світловому тракту присвоїти своє значення довжини хвилі, то абонентський сегмент знову за

своєю структурою стане нагадувати центральну частину мережі. Мережа стає масштабованою, так як в абонентській частині можна знову використовувати «другу лінійку» довжин хвиль для повідомлень абонентів, які не виходять в центральну частину, але представлені не у вигляді єдиної підмережі, а у вигляді багато доменного сегмента. Дійсно, з логічної (віртуальної) точки зору така мережа за рис. 2.4 починає нагадувати багатодоменні мережі Ethernet [8], в яких використовуються пристрої - мости, що і дозволяє забезпечити нерозповсюдження колізії в сусідні домени. У розглянутій схемі виникає ефект багаторазового використання довжин хвиль.

Але обговорювана мережева схема, хоча і забезпечує суттєве розширення мережі, проте, не вільна від недоліків і «важких місць». Одним з головних «важких моментів» слід вважати необхідність у підведенні тактового синхросигналу до пристрою OTDM, що забезпечує коректне розбирання ущільненого по тайм-слотах сигналу. Але таке мережеве завдання, як підстроювання синхронізації, навіть в електронному форматі і на істотно більш низьких бітових швидкостях вирішується досить складно. Тому і для повністю оптичної мережі з TDM, швидше за все, також доведеться використовувати спеціалізовані технічні пристрої і рішення. В якості прикладу одного з відповідних рішень можна навести повністю оптичний синхронізатор [63], реалізований на волоконно-оптичному петельному резонаторі спільно з використанням ефектом фазової крос-модуляції.

Іншим «важким моментом» мережевої архітектури по рис. 2.4 є відмова від режиму безпосередньої взаємодії вузлів, з'єднаних по зіркоподібній схемі, описаного для схеми з рис. 2.1, б. Дійсно, кожен з мультиплексорів OTDM має свою світлову адресу і, природно, він легко може зв'язуватися, наприклад, за протоколом Rainbow по груповому (агрегатному) потоку з сусідом або за запропонованим у другому розділі модернізованому протоколу, змінюючи лише довжину хвилі випромінюваного сигналу, але таким способом зв'язок вдасться встановити лише з мультиплексором, а не з яким-небудь абонентом, розташованим за зв'язуємим пристроєм OTDM. Для забезпечення зв'язком абонентів, розташованих за мультиплексорами, вимагається використовувати ще одну незалежну оптичну «коорди-

нату» окрім X. Наприклад, це можуть бути такі параметри оптичних імпульсів, як форма і чірп, характерним чином використовуємих в солітонових або нейронних мережах [11]. Безумовно, це суттєво ускладнює як світловипромінюючу, так і фотоприймальну частини мережі, але забезпечує повністю оптичну обробку сигналу до абонента. Інакше, визнавши описане вище важко реалізованим рішенням, можна в даному «місці» допустити використання електронної складової, переводячи мережу їх розряду AON в розряд «майже повністю оптичних» [1].

Остаточний вибір між рішенням по рис. 2.1 і за рис. 2.4 можна здійснити, порівнявши кількісні характеристики, що належать, взагалі кажучи, до різних рівнів OSI. На транспортному рівні слід розглянути показники завадостійкості передачі, і як основоположний з них показник - ймовірність бітових помилок PE при передачі між віддаленими парами абонентів. Якщо припустити, що в абонентських пристроях і на центральній станції принципи обробки сигналу не пов'язані з вибором з розглянутих топологій на абонентській ділянці, то в першому випадку, для мережі по рис. 2.1, PE₁ буде пов'язана в основному з функціонуванням комутатора волокон. А саме, PE₁ визначиться наявністю адитивного шуму в каналі, що виникає через можливу недостатню компенсацію керуючого випромінювання, підвищеним рівнем відображень у каналі, і спотвореннями форми сигналу в комутаторі і під дією багатопроменевої інтерференції в лінії. У другому випадку, для схеми з рис. 2.4, PE₂ так само буде пов'язана з можливим адитивним шумом, і одночасно - з можливою розсинхронізацією OTDM-пристроїв.

На наступному рівні, якщо припустити, що каналний і мережевий рівні об'єднані і управляються гнучким комутатором, то в якості кількісних характеристик можна вибрати метрики маршруту R₁ і R₂, що визначають кількість сегментів з ваговими коефіцієнтами, через які повинен проходити пакет для взаємодії віддалених абонентів, або споріднений параметр - тривалість затримки при передачі пакета [16]. Для того, щоб «зрівняти» властивості мережі для всіх пар абонентів, як правило, використовують зважену суму міжкінцевих затримок по всій мережі [16]. крім цього можна порівняти показники надійності, наприклад, ймовірності безвідмовної роботи Q₁ і Q₂.

Дослідження показників ефективності та виконання порівняння мереж за рис. 2.1 і за рис. 2.4 на цій основі виконано із застосуванням обчислювального експерименту, представленого в розділі 4. У цьому розділі далі зупинимося на дослідженні процесу розробки математичної моделі маршрутизації для розглянутих мереж, головним чином визначальною на верхніх рівнях ефективність їх роботи.

2.2 . Аналіз сучасних підходів до задачі маршрутизації цифрових сигналів

Термін «маршрутизація» (Routing) в даний час має не зовсім однозначне тлумачення. Згідно [2, 16, 38, 42], під ним розуміють: «Підсистему маршрутизації», «Протокол(и) маршрутизації», по [18, 36] – це «Обчислення маршруту», але в кожному разі це технічні (програмні) або математичні засоби для пошуку шляху доставки заданого пакета (заявки, повідомлення). Технічно підсистема маршрутизації являє собою мережу маршрутизаторів [8], які, завдяки закладеним в їх пам'яті маршрутним таблицям і аналізу інформації в пакетах, що надходять, перенаправляють їх, виробляючи відповідні команди для розташованих нижче (за шкалою OSI) комутаторів. Останні, у випадку, якщо це система типу Ethernet, встановлюють з'єднання з сусідніми комутаторами, створюючи тим самим віртуальні канали. Останнім часом впроваджуються суміщені пристрої комутатор з маршрутизатором - гнучкі комутатори (softswitch) [16]. Ці пристрої, так само як і маршрутизатори останніх версій, забезпечують моніторинг GoS - показників працездатності прилеглих сполучних напрямків, що дає можливість коригувати таблицю маршрутизації головним чином в залежності від завантаженості сполук. Але в даний час відсутні алгоритми маршрутизації, що враховують реальну роботоспроможність сегментів за показниками, крім PE (BER).

Існує одноколійна і альтернативна (багатоколійна) види маршрутизації [16]. У разі фіксованої маршрутизації від вузла - джерела до вузла - адресату використовується єдиний маршрут для передачі всього трафіку, що надходить і завдання зводиться до вибору оптимального шляху з усіх можливих шляхів, наприклад, за

критерієм швидкості доведення інформації (всього блоку переданих пакетів) до адресата. При альтернативній («розгалуженій») маршрутизації передбачається можливість поділу переданого трафіку на частини з наступною передачею цих частин за різними каналах, що в більш повній мірі використовує ресурси мережі [38], але вимагає від пристроїв дейтаграмного прийому [1].

Існує також розмежування на статичну і динамічну маршрутизацію [16, 38]. У першому випадку маршрут вибирається між кожною парою джерело-адресат відповідно до апріорно заданих вихідних даних, у другому - адаптивно у відповідності з поточними змінами в стані мережі.

Все це призводить до того, що завдання маршрутизації для багатодомених мереж є досить складними і в загальному випадку не дають оптимального рішення. Крім цього у використовуваних алгоритмах маршрутизації вельми слабо з теоретичної точки зору представлені топологічні обмеження мережі. А саме - завдання визначення шляху вирішується за принципом «кожний з кожним» [16], а не «з кінця в кінець» [5], що, безумовно, легше з обчислювальної точки зору, але може призводити як до довгих обхідних сегментів, так і до появи петель маршруту. Це призводить до необхідності як урахування властивостей конкретно розглянутої мережі, так і реальних технічних параметрів обладнання.

Стосовно розглянутого сегменту PON і схемами по рис. 2.1 та за рис. 2.4 можна представити випадок, для якого актуально рішення задачі альтернативної маршрутизації наступним чином, рис. 2.5. Довільні абоненти можуть бути з'єднані відразу з декількома напрямками «зірки».

Це має сенс для резервування, що характерно як для PON, що використовують в ряді випадків схеми повного резервування [9], так і взагалі для MAN, для яких значною мірою важлива задача вандалостійкості [8]. Аналогічно виникнення багатьох шляхів для передачі абонентських сигналів можливо і для схеми з рис. 2.4, т.я. пристрою TDM (OTDM) взагалі рекомендується включати по кільцю [14, 31]. Отже, можна говорити про завдання альтернативної маршрутизації стосовно розглянутого сегменту. Одноколійна маршрутизація можлива або, коли не-

має розгалужень виду рис. 2.5, або коли сигнал не допускає розділення на трафікові долі. Але в кожному разі для знаходження оптимальних маршрутів слід шукати теоретичні рішення задачі маршрутизації.

2.3 . Завдання статистичного моделювання процесу альтернативної маршрутизації пакетів

Постановка загальної задачі про вибір маршруту, згідно [16], може бути представлена наступним чином. Для відомої топологічної структури мережі (фізичної і набору віртуальних топологій), матриць вхідних потоків $\|\gamma_{ij}\|$ (повідомлень/с), що виникають у вузлі i і призначених вузлу j , пропускних здібностей ліній зв'язку $\|d_{kl}\|$ (байт/с) між вузлами k і l , середньої довжини повідомлень $1/\mu$, (байт), потрібно знайти змінні $x_{kl}^{(i,j)}$, що представляють собою частки потоків γ_{ij} , що проходять по лінії kl , рис. 2.6.

Завдання ставиться при дії ряду умов:

1. Значення шуканих долей потоків належать замкнутому інтервалу $x_{kl}^{(i,j)} \in [0,1]$. У цьому випадку інтенсивність потоку в лінії kl λ_{kl} (повідомлень/с), обумовлена усім мережевим трафіком $\gamma = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}$, де N - кількість вузлів мережі,

має вигляд

$$\lambda_{kl} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot x_{kl}^{(i,j)}. \quad (2.4)$$

2. Для змінних $x_{kl}^{(i,j)}$, згідно [1, 16] повинна виконуватися умова збереження потоку в мережі, що складається в наступного: передбачається, що система передачі функціонує, перебуваючи в точці рівноваги по станах станційного обладнання всій мережі. Так всієї телекомунікаційної системі ставиться у відповідність ланцюг Маркова, або марківський процес з дискретним безліччю станів, що характеризує повний набір варіантів взаємодії мережевих пристроїв. Такі стани для од-

ного мережного вузла наступні: режим передачі, стан сканування запиту (про вимогу пересилки інформації для даної станції), стан виявлення запиту, стан настройки приймача даної станції на сигнал передавальної станції, і т.д. Очевидно, що, по-перше, ці стани залежать від використовуваної системи сигналізації, способу багатоканальної передачі, і подібних особливостей мережі, по-друге, загальна кількість станів всієї системи зростає за законом факторіала від числа станів кожного вузла та кількості вузлів, і в загальному випадку є величезним. У наслідок цього безпосередньо вирішувати задачу про знаходження ймовірності перебування тієї чи іншої станції в деякому стані, так, як це було зроблено в попередньому розділі, і на основі цього визначати маршрут (за обраним критерієм оптимальності) в даному випадку не ефективно. Так, згідно з умовою збереження потоку в мережі передбачається, що очікуване зростання кількості станцій в будь-якому з станів телекомунікаційної системи дорівнює нулю, або те ж саме - очікуване число станцій, що входять в кожний стан системи, має бути рівним числу станцій, що виходять їх кожного стану системи на кожному часовому інтервалі Δt .

Згідно [16, 25], ця умова є наближенням, оскільки система рухається в окрестності цієї точки по фазовій траєкторії. Тим не менш відома математична формалізація представленої умови виглядає наступним чином [16]:

$$\sum_{k=1}^N x_{kl}^{(i,j)} - \sum_{l=1}^N x_{kl}^{(i,j)} = \begin{cases} -1 & l = i \\ 0 & l \neq i, j \\ 1 & l = j \end{cases} \quad (2.5)$$

2. Третьою умовою загальної задачі, як правило, є обраний(і) критерій(і) оптимізації. Повертаючись до відомої постановки завдання [16] відзначимо, що це вимога про мінімізацію середньої затримки повідомлення T в мережі (яка згідно з правилом Л. Клейнрока визначається як зважена сума міжкінцевих затримок T_{ij}):

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot T_{ij} = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \lambda_{kl} \cdot t_{kl} \rightarrow \min \quad (2.6)$$

В (2.6) t_{kl} середній час перебування повідомлення в лінії (k, l).

4. У відомій постановці також передбачається, що всі лінії зв'язку абсолютно надійні і завадостійкі (ймовірність помилки і ймовірність відмови дорівнюють нулю), вузли комутації мають пам'ять нескінченного розміру, час обробки сигналів на мережних вузлах відсутня, довжини всіх повідомлень незалежні і розподілені по показовому закону з середнім значенням $1/\mu$ трафік, що поступає в мережу, складається з повідомлень однакового пріоритету і утворює пуасонівський потік із середнім значенням інтенсивності γ_{kl} , а також кожна лінія зв'язку являє собою дуплексний канал з незмінною пропускнуою здатністю d_{kl} (якщо лінія зв'язку між вузлами k і l відсутня, то $d_{kl} = 0$). Іншими словами в даній постановці передбачається, що затримки в передачі повідомлень обумовлені чергами, що виникають через заняття (обслуговування попередніх заявок) станційних пристроїв адресатів і не пов'язані з реальними характеристиками програмно-апаратних засобів телекомунікацій.

Слід зауважити, що представлений підхід до задачі маршрутизації має практичну застосовність для мереж без спотворень з комутацією пакетів (повідомлень), коли інформація може передаватися по паралельних маршрутах. Однак з метою забезпечення практичної значущості відомої завдання маршрутизації необхідний облік реальних факторів спотворень. У зв'язку з цим середній час перебування повідомлення в лінії (k, l) залежить від часу передачі повідомлення по лінії $1/\mu \cdot d_{kl}$, пропонується оцінювати з наступних міркувань [7]:

$$\langle t_{kl} \rangle = \frac{1}{\mu \cdot \overline{d_{kl}}} + \langle W_{kl} \rangle + \langle H_{kl} \rangle, \quad (2.7)$$

де $\overline{d_{kl}}$ - величина математичного очікування пропускнуої здатності лінії, залежна від якості лінії (впливу перешкод і спотворень); $\langle W_{kl} \rangle$ середньостатистичне час

очікування повідомлення в черзі на вузлі з номером l ; $\langle H_{kl} \rangle$ - середньостатистична величина затримки, викликаной з спотвореннями в лінії (за фізичним або алгоритмічним причин, що, можливо, пов'язано з технічними особливостями роботи оптичних перемикачів). Так як для забезпечення достовірності передаваної інформації відомі системи сигналізації у разі втрати або спотворень сигналу понад установлені значення виробляють запит на повторну передачу [38], то в реальній мережі пропускна здатність кожної лінії не може залишатися незмінною.

Можна говорити про середню пропускну здатність або математичному очікуванні випадкової величини d_{kl} . Очевидно, що $\overline{d_{kl}}$ пов'язано з фактичною надійністю лінії включаючи надійність мережевих вузлів k и l . Загальне реальне час очікування повідомлення в черзі W_{kl} на відміну від відомого співвідношення, має включати тривалість його обробки на комутаційному вузлі з номером l . Тоді для випадку равнопріорітетного трафіку (що використовується в переважній більшості незважаючи на теоретичні роботи по різнопріорітетності трафіку, наприклад, [16 – 18 та ін.) і показового розподілу середньої довжини повідомлення (за наявності нескінченної пам'яті на вузлі комутації), середньостатистичне значення $\langle W_{kl} \rangle$ має визначатися наступним чином [67]:

$$\langle W_{kl} \rangle = \frac{1}{\mu \cdot d_{kl}} \cdot \frac{\lambda_{kl}}{\mu \cdot \overline{d_{kl}} - \lambda_{kl}} + \lambda_{kl} \cdot \langle \delta t_k \rangle \quad (2.8)$$

де $\langle \delta t_k \rangle$ - середній час обробки одного інформаційного біта станційним обладнанням вузла k . Тут передбачається, що величина δt_k може варіюватися залежно від стану реальної працездатності апаратури даного вузла і технічних властивостей повністю оптичних пристроїв. Тоді після підстановки (2.8) в (2.7) за аналогією з відомим підходом [16], отримуємо:

$$\langle t_{kl} \rangle = \frac{1}{\mu d_{kl} - \lambda_{kl}} + \lambda_{kl} \cdot \langle \delta t_k \rangle + \langle H_{kl} \rangle \quad (2.9)$$

При підстановці співвідношення (2.9) в (2.6) виходить вираз для середньої затримки повідомлення по мережі, на відміну від відомого, що враховує реальні фактори спотворень:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left\{ \frac{\lambda_{kl}}{\overline{\mu d_{kl}} - \lambda_{kl}} + \lambda_{kl}^2 \cdot \langle \delta t_k \rangle + \langle H_{kl} \rangle \cdot \lambda_{kl} \right\} \quad (2.10)$$

Або з урахуванням (2.5), запишемо:

$$T = \frac{1}{\gamma} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_y \cdot x_{kl}^{(i,j)} \times \left\{ \frac{1}{\overline{\mu d_{kl}} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_y \cdot x_{kl}^{(i,j)}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_y \cdot x_{kl}^{(i,j)} \times \langle \delta t_k \rangle + \langle H_{kl} \rangle \right\} \right] \quad (2.11)$$

Вираз (2.11) являє завдання пошуку оптимального маршруту, вибір якого мінімізує T , для реальної мережі з комутацією пакетів (повідомлень), в якій допустимо поділ заданого трафіку γ_y на шукані складові частини $x_{kl}^{(i,j)}$ призначені для передачі по лініях (k,l) , $k, l = \overline{(1, N)}$.

Значення H_{kl} і δt_k можуть бути знайдені шляхом обробки результатів вимірювань, даних з експлуатації, або за допомогою моделювання їх у вигляді випадкових процесів з використанням методик статистичного моделювання випадкових процесів [68].

Звідси очевидно, що величини H_{kl} і δt_k також як і $\overline{d_{kl}}$ виявляються пов'язаними з параметрами, характеризують якість надання послуг (GoS) і якість обслуговування (QoS). При виявленні виду такої залежності (отриманої, наприклад, експериментально $\langle H_{kl}(PE) \rangle$ або $\langle \delta t_k(PE) \rangle$ при зміні ймовірності бітових помилок PE) оператор отримує можливість моделювати реальний процес маршрутизації, адекватно підбирати або розробляти найбільш підходящий алгоритм маршрутизації. Нижче представлені результати порівняння середньої затримки повідомлень для асинхронної мережі з ядром MPLS, отримані на основі чисельного моделю-

вання величин $\langle H_{kl} \rangle$, $\langle W_{kl} \rangle$ и $\overline{d_{kl}}$ залежних від PE, коефіцієнта помилок по секундах з помилками (ESR) і коефіцієнта помилок по блоках з фоновими помилками (повік) [31] для корпоративної мережі.

3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ЗА ВИЗНАЧЕННЯМ ОПТИМАЛЬНОЇ ТОПОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ЦИФРОВОЇ МЕРЕЖІ

3.1 . Мета і методика проведення обчислювального експерименту

Запропонований у розділі 2 зіркоподібний сегмент для PON володіє досить хорошими показниками працездатності, зокрема, його фізичний пристрій забезпечує мінімальний час доставки повідомлення між двома довільними парами абонентів T_{ab} в порівнянні з будь-якими іншими топологіями (наприклад, кільцевий) з такою ж кількістю вузлів. Це обумовлено однаковістю побудови для всіх напрямів і дециєю параметра HD, а також відсутністю «думаючих» пристроїв. Дійсно, між довільними парами абонентів розташоване дві логічної дистанції (див. рис. 2.1, б): від абонента 1 до зіркоподібного розгалужувача і від розгалужувача до абонента 2, тобто $HD = 2^1$. Так йде справа, якщо потрібно враховувати властивості розгалужувача. А якщо в останньому необхідності немає, то й зовсім $HD = 1$, отже, можна сказати, що топологія абонентського сегмента, представлена на рис. 2.1, б, вже є оптимальною за критерієм $T_{ab} \rightarrow \min$ в задачі взаємодії абонентів між собою завдяки її фізичним властивостям - симетричності щодо довільного абонента і однозначності побудови. Але дана топологія хороша для мереж з малою кількістю абонентів за невеликого числа незалежних каналів, які можна забезпечити.

Виправити недолік з кількістю каналів призвані схеми рис. 3.1 і рис. 3.3. Але дані топології є складними т. я. призводять до багатодоменної побудови мереж, при якій, враховуючи нерівномірність, районну неідентичність і динаміку міської забудови, можлива поява декількох шляхів між парами абонентів. Це призводить до того, що актуальним стає завдання знаходження оптимальної топології. Більш того зазначені факти можуть приводити до нерівномірності побудови і основної топологічної схеми, що загострює розглянуту - задачу.

Таким чином, метою обчислювального експерименту є знаходження (розробка) оптимальної топології для багатодоменого абонентського сегмента зірко-

подібній PON по критерію забезпечення найбільшої кількості каналів з підтримкою QoS.

Під підтримкою QoS тут розуміється, по-перше, забезпечення $PE \rightarrow \min$ з урахуванням того, що помилка, може виникати як через фізичні властивості сегмента, що пов'язано з відбитою хвилею (див. вираз - (3.2) для Δt) так і бути - пов'язаною з властивостями реального сигналу, що надходить на сегмент. По-друге, під підтримкою QoS розуміється $T_{аб} \rightarrow \min$ за умови використання алгоритму маршрутизації RSVP. Для параметра $T_{аб}$ передбачається що воно - пов'язано з властивостями лінії передачі, що характеризуються параметрами W_{kl}, H_{kl} і $\overline{d_{kl}}$ параметрами маршрутизації пакета T і J_T , а також ймовірністю достовірного прийому пакета з урахуванням її теоретичного $P_{a\Sigma}$ і реального значення $P_{\partial,real}$.

Бажання отримати найбільшу кількість каналів пов'язано з тим, що це дає можливість забезпечити найбільшу кількість послуг для багатьох абонентів.

Поставимо в задачі топологічні обмеження. Сегмент повинен-бути симетричним по обладнанню. Сегмент будується тільки із застосуванням однакового обладнання - або з застосуванням комутаторів (рис. 3.1), або OTDM-ущільнення (рис. 3.4). У разі застосування комутації волокон допускається каскадне включення комутаторів, рис. 3.1, а, але на всьому сегменті застосовуються комутатори тільки одного типу. Іншими словами, якщо вирішено застосовувати комутатор 1×2 , то на базі нього будується весь абонентський сегмент у всіх ярусах.

Для OTDM-схем ярусного включення не допускається, тобто розглядається єдиний варіант - за рис. 3.3. Варіація в кількості каналів забезпечується шляхом використання OTDM-пристрої з відповідним їх кількістю.

Через необхідність врахування великої кількості параметрів і факторів для кожної ділянки мережі (у тому числі індивідуальних перешкод і спотворень), мінливих більшою мірою випадково протягом часу, отримання ефективного вирішення поставленого завдання в аналітичному вигляді, взагалі кажучи, неможливо. Більш доцільним є проведення обчислювального експерименту із залученням імітаційного моделювання цифрових сигналів, що дозволяє отримати ймовірність

помилки у вхідному сигналі ревом з урахуванням як відхилень амплітуди A_{real} від встановленого значення $A^{(1)}$ так і можливого зсуву імпульсів або девіації часового інтервалу [14] (ДЧІ). Необхідно враховувати, що ДЧІ є випадковою величиною, отже, для того, щоб змоделювати випадкову форму цифрового сигналу з урахуванням ДЧІ, позначимо її величину θ необхідно задатися її щільністю розподілу ймовірності \mathfrak{Z} .

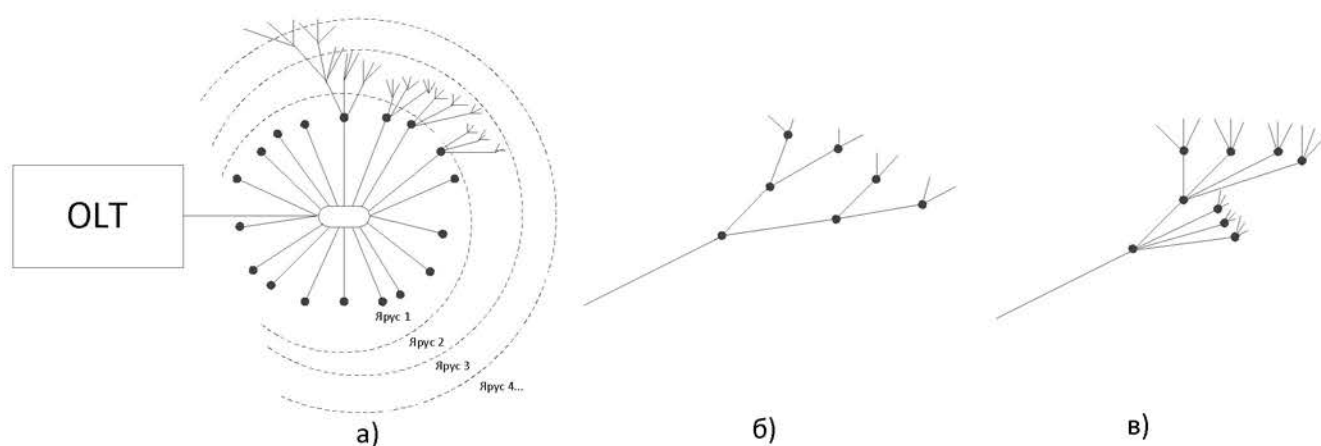


Рисунок 3.1. Принцип симетричного побудови пасивної оптичної мережі з використанням комутаторів: а - ілюстрація ярусної структури; б і в - ілюстрації застосування комутаторів відповідно 1 x2 і 1x4

У результаті такого обчислювального експерименту передбачається отримати як найкращу в поставленому завданні топологічну схему, так і характеристики мережі в залежності від зміни параметрів, що задаються, на рис. 3.2 представлена методика проведення обчислювального експерименту.

Для проведення розрахунків з імітаційного моделювання всі стохастичні залежні від часу характеристики - реальні параметри цифрових сигналів (послідовність імпульсів, їх амплітуда, джитер і ДЧІ), пропускні спроможності ліній, тривалості очікування повідомлень в черзі і т.д. передачі були представлені у вигляді псевдовипадкових числових послідовностей [19] з певними (такими, що задаються або знаходяться) щільностями розподілу ймовірності. При складанні програм розрахунку для імітації випадкових величин використовувалася стандартна, підп-

рограма генерування псевдовипадкових чисел Randomize (рівномірно розподілені числа z в інтервалі $[0, 1]$). Отримання статистично вірного результату забезпечувалося перевіркою кожної такої послідовності на «випадковість» за критерієм Пірсона [19].

Так інтервал $[0, 1]$ розбивався на $N^{(z)}$ (згідно [68], $N^{(z)} = 10 \dots 20$) рівних проміжків, і фіксувалося кількість α , псевдовипадкових чисел ($\alpha = 1 \dots N^{(z)}$), що потрапляють у відповідний проміжок.

Отримані емпіричні частоти $\beta_\alpha = \alpha / N^{(z)}$ (α - загальна кількість чисел) порівнювалися з теоретичними ймовірностями $1/N^{(z)}$, при цьому вироблявся критерій χ^2 :

$$D^2 = \sum_{\alpha=1}^N \left\{ \beta_\alpha - \frac{1}{N^{(z)}} \right\}^2. \quad (3.1)$$

Далі було потрібно, щоб величина D^2 була не більша наперед задається значення $\xi_{\text{нпр}} > 0$ - допустимого відмінності емпіричних частот появи чисел від теоретичних ймовірностей, тобто $D^2 \leq \xi_{\text{нпр}}$.

Параметри $T_{\text{аб}}$ і $PE_{\text{вих}}$ є ті результуючі параметри якості по QoS і по GoS відповідно, за якими можна робити висновок про доцільність застосування даного мережевого сегмента.

Всі розрахунки проводилися для $\xi_{\text{нпр}}$ не більше 0.005 на відріжку, меншому відріжка аперіодичне. Останній пов'язаний з тим, що перші α числа будуть всі різними, а наступне число зважаючи на кінцеве число знаків у клітинці неодмінно співпаде з одним з раніше виданих чисел. Після статистичної перевірки з кожної рівномірно розподіленої послідовності формувалася послідовність чисел з необхідною функцією щільності розподілу ймовірності [19].

Для отримання псевдовипадкових чисел, підлеглих довільному закону роз-

поділу ймовірності, наприклад з функцією $F^{(N)}(\partial)$ необхідно рівномірно розподілені в інтервалі $[0, 1]$ числа z підставити у функцію, зворотну $F^{(N)}(\partial): z^{(N)} = (F^{(N)}(z))^{-1}$. При цьому числа $z^{(N)}$ підкорятимуться розподілу $F^{(N)}(\partial)$:

$$P(z^{(N)} < \partial) = P\left[\left(F^{(N)}(z)\right)^{-1} < \partial\right] = P\left[z < F^{(N)}(\partial)\right] = F^{(N)}(\partial), \quad (3.2)$$

Після отримання числових моделей стохастичних величин, розроблені програми [59, 71] забезпечили імітацію процесу передачі сигналів з урахуванням реальних характеристик обладнання: кінцевого часу очікування повідомлення в черзі, пропускної здатності лінії і т.д.

3.2 . Методика статистичного моделювання цифрових сигналів

Моделювання імпульсного сигналу з випадковою в загальному випадку формою імпульсу і тривалістю вирішено було провести з використанням теорії випадкових потоків [19]. Так модельний сигнал представляв собою трипараметричну випадкову систему. Першим параметром був випадковий потік одиниць для сигналу даних (безпосередньо сам сигнал - трафік). Другим параметром була тривалість такту, що визначає ДЧІ і неузгодженість; і третім параметром - форма імпульсу, що залежить від джитера і шуму в каналі.

Для чисельного моделювання сигналу даних генерувалося чотири псевдовипадкові послідовності:

- $[z^{(I)}]$ відповідає за формування випадкового потоку одиниць. Випадковим чинником був проміжок часу (кількість тактових інтервалів) між одиничними імпульсами. Генеруєма послідовність формувала сигнал протягом інтервалу спостереження в якому-небудь розглянутому каналі з номером j .
- на базі $[z^{(II)}]$ моделювалася ДЧІ. Випадковим чинником було значення тривалості такту. Генеруєма послідовність також брала участь у формуванні

сигналу в цілому - кожне псевдовипадкове число з $[z^{(II)}]$ брало участь у визначенні відповідного значення реальної тривалості такту - одне число на один такт.

- на базі двох послідовностей $[z^{(III)}]$ і $[z^{(IV)}]$ моделювалося тремтіння фази (джитер [14]) і рівень шуму в каналі передачі. Випадковими факторами були: амплітуда джитера і амплітуда шуму. Тут послідовність $[z^{(III)}]$ визначала амплітуду джитера в кожному такті для всього сигналу відразу - за аналогією з попереднім випадком: одне число з $[z^{(III)}]$ на один такт. А послідовність $[z^{(IV)}]$ генерувалась всякий раз для кожного такту - скільки тактів в інтервалі спостереження, стільки ж і послідовностей $[z^{(IV)}]_1$.

Моделювання шуму в такті з довільним номером $l \in [1, N]$ вироблялося таким чином. Реальна тривалість такту, отримана з урахуванням $[z^{(II)}]$, розбивалася на велике число (рівне кількості чисел в $[z^{(IV)}]$) інтервалів тривалістю. У програмі [71] це відповідало $(1000: 2000) \cdot \delta t = \tau_{\text{пер}}$. Конкретне число розбиття вибиралося за замовленням оператора. На кожній з ділянок δt обчислювалася реальна амплітуда сигналу виходячи з відповідного цієї ділянки числа $[z^{(IV)}]$ і переданого значення оптичної потужності (0 або 1).

Для наближення одержуваних характеристик сигналу до реально спостережуваним, з рівномірно розподілених послідовностей $[z^{(I)}], [z^{(II)}], [z^{(III)}], [z^{(IV)}]$ після перевірки їх на «випадковість» відповідно до (3.1), формувалися селестічні числові послідовності з задаваною функцією щільності розподілу ймовірності відповідно до (3.2). Так представлена вище методика моделювання ДЧІ, джитера і т.д. мала місце не по відношенню до рівномірно розподіленим числових послідовностей $[z^{(I)}], [z^{(II)}], [z^{(III)}], [z^{(IV)}]$, а по відношенню до псевдовипадкових числових послідовностей з необхідною щільністю розподілу ймовірності, одержуваних на їх основі.

Для формування потоку одиниць, що представляє собою сигнал даних, використовувалося розподіл Ерланга другого порядку [19]. На відміну від потоку Пуассона [19], потоки з розподілом Ерланга від першого порядку і вище відносяться до класу потоків з обмеженим післядією (потокам Пальма) і найбільш правдоподібно відображають реальний інформаційний сигнал зі скремблером [14, 31]. Потік Пуассона, який визначається центральною граничною теоремою - для потоків, згідно [19] є потоком без післядії тобто випадковий момент настання кожної події не залежить від моментів часу вже наступили подій. Для моделювання інформаційного сигналу, що переносить слова, знаки, символи і т.д. було б неправильним використовувати потік без післядії. Згідно [3] та іншим фундаментальним роботам з теорії інформації, в будь-якому інформаційному повідомленні існує надмірність, а значить і вплив попередніх символів на наступні - тобто післядія.

Для випадкового потоку щільність ймовірності настання чергового події, якого підпорядкована розподілом Ерланга II порядку, згідно [19], має вигляд:

$$p_2(t) = I_2^2 \cdot t \cdot \exp(-I_2 \cdot t) \quad (3.3)$$

де I_E - інтенсивність потоку; t - час.

$I_E(t)$ є межа відносини ймовірності надходження не менше одного імпульсу (позначимо подію надходження імпульсу з оптоволоконного тракту на фотоприймач за I) в проміжку $[t, t + \delta t]$ до величини цього проміжку δt при $\delta t \rightarrow 0$, [19], або:

$$I_E(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{P_{H \geq 1}(t, t + \delta t)}{\delta t} \quad (3.4)$$

Для стаціонарного потоку справедливо: $P_{H \geq 1} = I_E \cdot \delta t + o(\delta t)$.

Тут $o(\delta t)$ - нескінченно мала величина в порівнянні з $I_E \cdot \delta t$. Знайдемо I_E в розглянутій завданню по відношенню до цифрового потоку Ethernet 10 Мбіт/с.

Реальний сигнал з урахуванням вводиться скремблера, надмірності при ко-

дуванні і т.д. має значення середньостатистичної скважності $\chi \cong - 3.1 \dots 3.2$ [14].

Скремблер вводять для забезпечення сприятливого режиму роботи фотоприймачем ідеальним вважається випадок $\chi \sim 2$ (реально недосяжний). Шпаруватість характеризує кількість імпульсів логічних одиниць у певному кількості тактових інтервалів. Звідси знайдемо інтенсивність потоку:

$$P_{H \geq 1} = I_E \Delta t \cdot \chi \text{ або } I_E = (\Delta t \cdot \chi)^{-1} \approx 1,3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1} \quad (3.5)$$

Отримане значення відповідає реально спостережуваному сигналу даних по вказаному потоку (у робочий час). У розглянутій задачі закон перетворення випадкових чисел (3.2) для потоку інформаційних одиниць виглядає наступним чином:

$$z^{cuzn} = F_{Epi}^{-1} \left[I_E^2 \cdot \int_0^t t \cdot e^{-I_E t} \cdot dt \Big|_{t=z^{(t)}} \right] \quad (3.6)$$

Вираз (3.6) справедливо для кожного часового такту з номером $j \in [1, N]$ для всіх розглянутих каналів; $1 \in [1, N]$ на кожному мережевому вузлі. Випадковий інтервал часу між одиничними імпульсами визначався як добуток $z^{cuzn} \cdot \Delta t$, рис. 3.3.

Аналогічно розглянутому вище способу на базі $[z^{(II)}]$ моделювалося значення девіації часового інтервалу.

Для отримання таблиць функцій $\mathfrak{Z}_j^{(h)}$ було проаналізовано 10 вимірів реалізацій процесів $\theta(t)$, які проводилися в робочий час в інтервалі $9^{00} - 13^{00}$. На рис. 3.4 представлені деякі графіки, отримані за результатами вимірів. Перетворення випадкових чисел (3.2) для значення тривалості такту відповідно до графічних залежностей рис. 3.4 проводилося шляхом чисельної інтеграції:

$$z^{dchi} = F_{dchi}^{-1} \left[\int_0^t \mathfrak{Z}_{dchi}(t) dt \Big|_{t=z^{(n)}} \right]. \quad (3.7)$$

Випадкова реальна тривалість такту приймала значення: $\tau_{nep} = z^{dchi} \cdot \Delta t$.

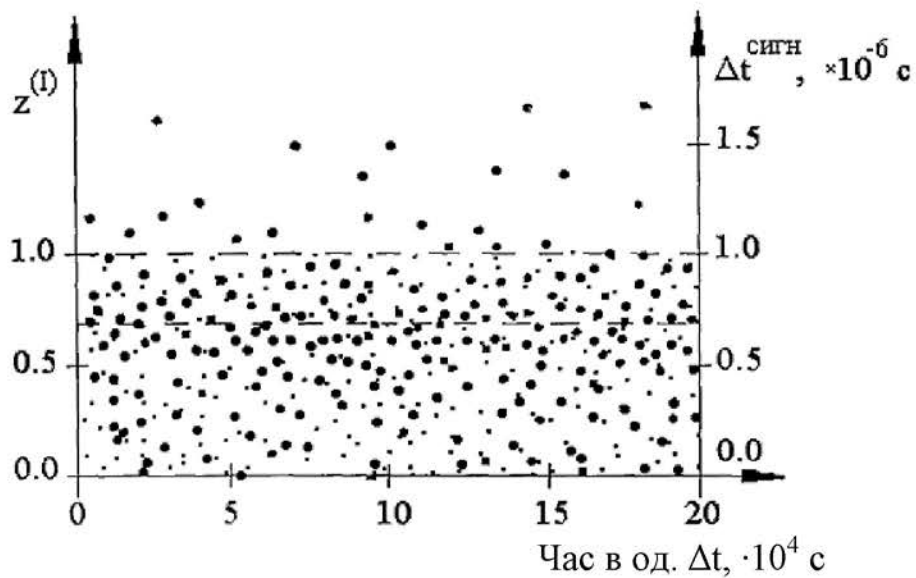


Рисунок 3.3. Порівняльна діаграма чисел $z^{(l)}$ і $\Delta t^{\text{сигн}}$ отриманих для $\xi_{\text{тур}} \leq 0.005$.
 Максимум щільності розподілу ймовірності чисел $t^{\text{сигн}}$ настає при $\sim 0.769 \cdot 10^{-6}$ с,
 часовий такт $\Delta t \approx 0.244 \cdot 10^{-6}$ с. Щоб уникнути загушеності на діаграмі зображено
 одна з тисячі значень

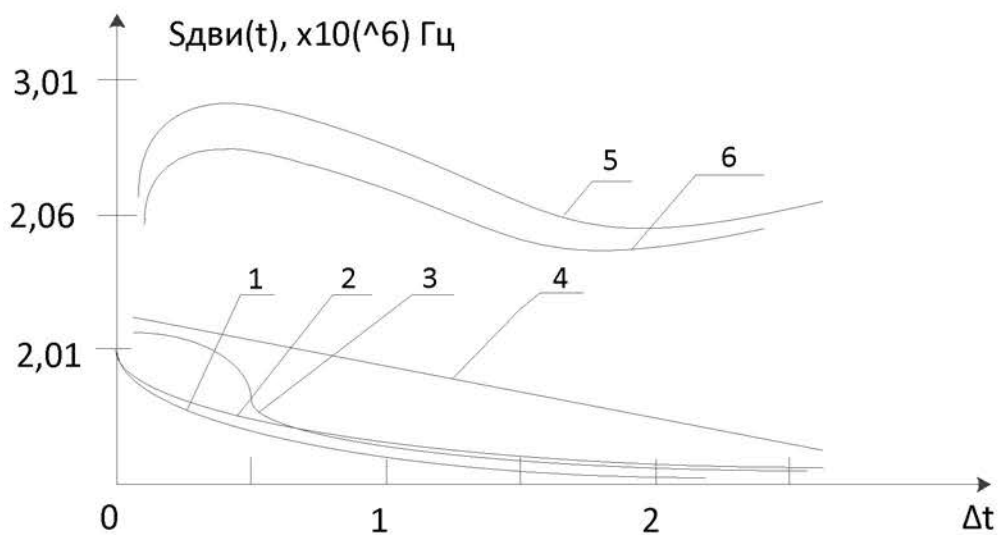


Рисунок 3.3. Графіки функції щільності розподілу ймовірностей і значення ДЧІ,
 отримані шляхом аналізу величини θ по записах журналу експлуатації на мере-
 жних вузлах: 1 - АТС 33/35, 2 - АТС 54/55, 3 - АТС 37, 4 - АТС 30/34, 5 - АТС і 6 -
 АТС 60/64

На базі решти двох послідовностей $[z^{(III)}]$ і $[z^{(IV)}]$ моделювалося дію перешкод у каналі. Послідовність $[z^{(III)}]$ використовувалася для отримання функції джитера Φ^E відповідно до визначеної стандартом [11] рівномірно розподіленим його щільністю ймовірності. Джитер в телекомунікаційних системах виникає під дією багатьох чинників - помилок при логічній обробці сигналу, появі некоректних сигнальних компонентів, різного роду порушення і т.д. По-суті джитер – високочастотне «тремтіння» або розмиття фронтів імпульсів. Амплітуда джитера визначає тривалість цього розмиття, рис. 3.5, протягом такту. Частота джитера - це частота накладених коливань на фронт імпульсу. Як правило, такі накладені коливання мають частоту багато більше частоти сигналу. Частотна маска допустимого джитера, згідно [11], для сигналу рівня Ethernet 100 Мбіт/с і нижче представлена на рис. 3.6. Т.я. розподіл чисел $z^{дж}$ залишається рівномірним, то відповідно до [11] запишемо:

$$z^{дж} = t_{дж} = z^{(III)} \cdot 0.15 \cdot \Delta t. \quad (3.8)$$

Числа $z^{дж}$ являють собою амплітуду випадкового джитера в кожному такті за принципом «одне число $z^{дж}$ на один такт». При наявності джитера у вирішальних пристроях не вдається достовірно встановити факт перевищення значення оптичної потужності (амплітуди) прийнятого сигналу над встановленим її пороговим значенням. Чим більше амплітуда джитера, тим менший час залишається для прийняття рішення і тим більше вірогідність помилки. Крім цього джитер зменшує корисну енергію всередині такту [31], збільшуючи шумову енергію.

Моделювання імпульсного сигналу з урахуванням джитера вироблялося таким чином: на що потрапляють в область джитера інтервалах δt (у кожному з яких діє певне значення шуму, див. нижче) значення шуму посилювалося в 10 разів.

Це, як показав попередній результат статистичного моделювання, найбільш правдоподібно відображало реально спостережуваний сигнал. Амплітуда сигналу в області джитера для $l_{\delta t} \cdot \Delta t \leq z^{дж}$ становила, рис. 3.7:

$$A_{реал}^{Дж}(\Delta^* t) = 10 \cdot A^{(1)} \cdot z^{III}(\Delta^* t) \text{ або } A_{реал}^{Дж}(\Delta^* t) = 10 \cdot A^{(0)} \cdot z^{III}(\Delta^* t) \quad (3.9)$$

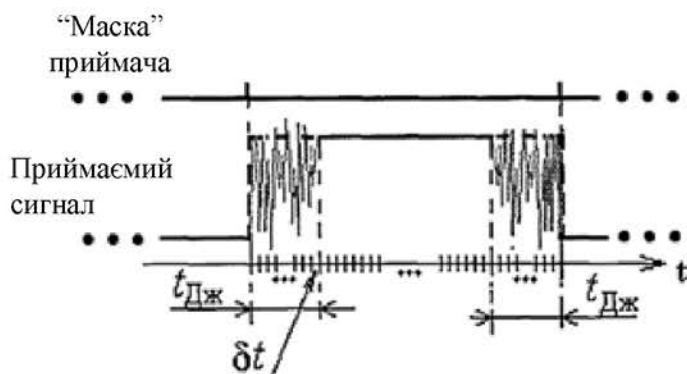


Рисунок 3.5. Феноменологічний уявлення джитера в такті. Области $t_{Дж}$ характеризують амплітуду джитера

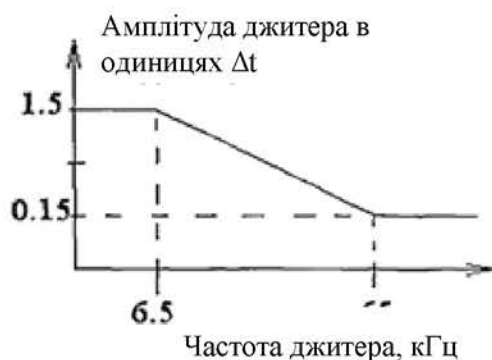


Рисунок 3.6. Допустима маска джитера по [11]. Для часто зустрічається джитера з частотою вище 65 кГц його амплітуда не повинна перевищувати $0.15 \cdot \Delta t$

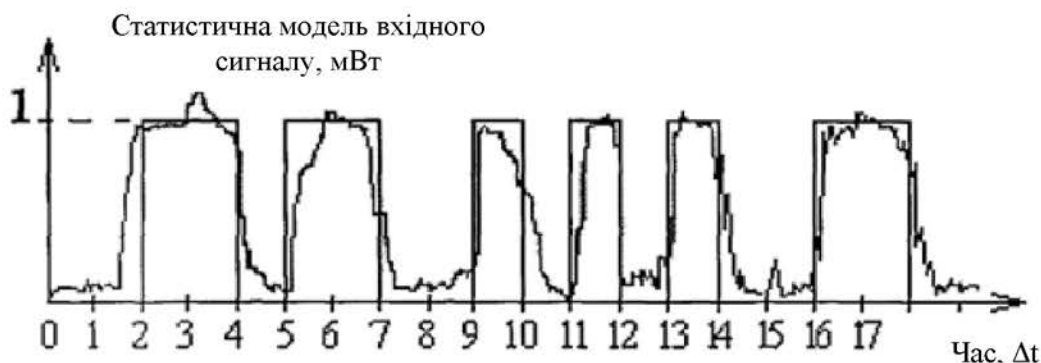


Рисунок 3.7. Статистична модель вхідного сигналу з урахуванням шуму, джитера і ДЧІ в каналі передачі Ethernet 10 Мбіт/с. Рівними лініями представлений ідеальний сигнал в коді СМІ (з інверсією комбінацій) [31]

В (3.9) $A^{(0)}$ і $A^{(1)}$ - номінальні значення сигналу - логічної 1 або логічного 0, визначаються телекомунікаційними стандартами, (не плутати, з рівнем оптичної потужності логічної одиниці на виході передавального пристрою $A_{реал}^0$); l_{δ} - лічильник інтервалів Δt всередині довільного такту Δt з номером l ; $z^{III}(\Delta t)$ - псевдовипадкове число, що визначає рівень шуму на досліджуемому інтервалі Δt з но-

мером 1_{δ} .

На базі псевдовипадкової послідовності z^{IV} формувалася шумова функція \mathbf{I}^A . Передбачалося, що чинний в каналі шум має нормально розподілені випадкові значення. З використанням співвідношення (3.2) знайдені випадкові числа z^{III} , нормально розподілені в інтервалі $[-3\sigma^{E1}, 3\sigma^{E1}]$ навколо математичного сподівання $\langle \mathbf{I}^A \rangle$. Відповідно до розрахунків представлених у [68], було прийнято:

$\langle \mathbf{I}^A \rangle \cong 83...85$ мкВт, $\sigma^{E1} \cong 150$ мкВт, якщо рівень потужності логічної одиниці становить близько 1 мВт. Відповідно з [19] запишемо:

$$z^0 = F_0^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma^E}} \cdot \int_{-\infty}^M \exp \left(-\frac{(M - \langle \mathbf{I}^E \rangle)^2}{2(\sigma^E)^2} \right) \cdot dM \Big|_{M=z^{IV}} \right] \quad (3.10)$$

де M - змінна інтегрування.

Далі для кожного значення 1_{δ} на протязі всього такту визначалася амплітуда реального сигналу:

$$A_{real}(\Delta t) = A^{(1)} \cdot z^{(III)}(\Delta t) \text{ або } A_{real}(\Delta t) = A^{(0)} \cdot z^{(III)}(\Delta t) \quad (3.11)$$

Тут, шуми накладалися на джитер (враховувалися повторно). Проте, як зазначалося вище, дана чисельна модель імпульсного сигналу достовірно відображала спостережуваний сигнал. На рис. 3.7 представлена одна з реалізацій отриманого таким чином модельного цифрового сигналу.

3.3 . Методика статистичного чисельного моделювання впливу спотворюючих факторів на процес маршрутизації цифрових сигналів

Відповідно до викладеного в розділі 3, час доставки повідомлення до абонента $T_{аб}$ залежить від властивостей мережі, які, при маршрутизації з протоколом RSVP в випадку допустимості поділу потоку на трафіковий частки, характеризу-

ються параметрами: $\langle W_{kl} \rangle = f_a(\delta t_k)$, $\langle H_{kl} \rangle$ і \bar{d}_{kl} . Останні в загальному випадку пов'язані з поточними значеннями $PE, P_{D,\Sigma}$, а для нестационарного стану мережі – додатково ще й з коефіцієнтом помилок по секундах з помилками (ESR) і коефіцієнтом помилок по блоках з фоновими помилками (BBER). Тут мова йде про маршрутизацію тільки абонентського сигналу, тому що час доставки службового сигналу, що належить протоколу RSVP, є фіксованим, закладено в програму станційних пристроїв і не повинно бути перевищено. Інакше виникає збій помилково службового сигналу, що призводить до команди про нову передачу всього (повного) повідомлення абонента. Отже, для службового сигналу RSVP справедливо лише говорити про одержуваному ним джитері J_T , який може бути розрахований на підставі співвідношення (3.19), і впливає на $T_{аб}$ стрибкоподібно.

Щоб забезпечити замкнутість у розглянутій задачі моделювання топологічних схем мережевих сегментів, містять ті чи інші пристрої, що і призводить до появи спотворюючих факторів, слід отримати взаємозв'язок параметрів $\langle H_{kl} \rangle$, $\langle W_{kl} \rangle$, $\bar{d}_{kl}, PE, P_{D,\Sigma}$ від фізичних властивостей зазначених пристроїв та ліній, що враховують динамічні особливості їх роботи. Однак останнє не має можливості через, по-перше, велику різноманітність зазначених пристроїв, по-друге, необхідністю врахувати величезне число факторів, і, можливо, виконати моделювання ряду взаємодіючих характеристик. Остання являє собою окрему наукову роботу, а в рамках магістерської роботи для забезпечення спроможності моделювання пропонується зупинитися на узагальненому описі, яке складається в наступному. Нехай для зазначених параметрів справедливо:

$$\begin{cases} \langle W_{kl} \rangle = f_a(\delta t_k) = a_{kl} \cdot \delta t_k + b_{kl} \cdot PE_{\Sigma}; \langle H_{kl} \rangle = h_{kl} \cdot P_{D,\Sigma}(PE_{\Sigma}) + r_0; \\ \bar{d}_{kl} = s_{kl} \cdot P_{D,\Sigma}(PE_{\Sigma}) + d_0; PE_{\Sigma} = PE_{ax} + PE_{\Delta_-}; \end{cases} \quad (3.12)$$

де $PE_{\Delta_-} = 1 - \frac{A^{(H)} - \text{sign}(0,5\Delta_-)}{A^{(H)}}$, амплітуда відбитої хвилі Δ_- розраховується згідно співвідношенню (3.2), $A^{(H)}$ - номінальне значення амплітуди сигналу (одиниця

чи нуль залежно від того, який сигнал виходить в даному тактовому інтервалі в результаті моделювання); з цим же пов'язано застосування функції $sign(0,5\Delta_)$.

Параметри, що входять до (3.12), можна визначити наступним чином: δt_0 - номінальний (довідковий) час обробки одного інформаційного біта. Нехай також r_0 і d_0 - середні номінальні (довідкові) значення алгоритмічної затримки і пропускної здатності узагальненої лінії [38] відповідно; a_{kl} , b_{kl} , h_{kl} і s_{kl} - коефіцієнти, які задаються в обчислювальному експерименті і визначають специфіку (унікальні властивості) ліній і пристроїв. Взаємозалежність $P_{\delta,\Sigma}(PE_{\Sigma})$ для мережі з RSVP визначається співвідношенням (3.17).

Тут же передбачається, що PE_{ex} пов'язана з амплітудою A_{real} реального цифрового сигналу, що містить спотворення, яка визначається в результаті чисельного моделювання, рис. 3.7:

$$PE_{ex} = PE_{ex}(0|1) \cdot P_{ex}(1) + PE_{ex}(1|0) \cdot P_{ex}(0), \quad (3.13)$$

де $P(1)$ і $P(0)$ - імовірності посилки біта логічної одиниці і логічного нуля відповідно, $PE_{ex}(0|1)$ і $PE_{ex}(1|0)$ - умовні ймовірності помилки.

Реальний цифровий сигнал з урахуванням вводимого скремблера, надмірності при кодуванні і т.д. має нерівноймовірну появу логічних 1 і 0 внаслідок чого з'являється післядія(логічна залежність) символів в інформаційному сигналі [3]. У цьому випадку:

$$P_{ex}(1) = \frac{1}{\chi}; P_{ex}(0) = 1 - \frac{1}{\chi}. \quad (3.14)$$

В (3.14) χ - середньостатистична (довідкова) шпаруватість імпульсів, яка в дискретних системах передачі (де тривалість такту при передачі 1 дорівнює тривалості такту при передачі 0) дорівнює [31]: $\chi = \lim_{N^{III} \rightarrow \infty} \frac{N^{III}}{N^{(1)}}$. Тут N^{III} - кількість тактових інтервалів, $N^{(1)}$ кількість логічних одиниць на N^{III} .

Умовні ймовірності слід підрахувати виходячи з граничного значення $A_j^{(k)}$ на k -му влаштуванні в j -му каналі та математичного очікування $\mu(A_{реал})$:

$$PE_{kl, ex}^{(k)}(0|1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо математичне сподівання } \mu(A_{реал}) < A_j^{(k)}, i \\ \left| 1 - \frac{\mu(A_{реал}) - A_j^{(k)}}{A_j^{(k)}} \right|, & \text{якщо } \mu(A_{реал}) > A_j^{(k)}, \end{cases} \quad (3.15)$$

$$PE_{kl, ex}^{(k)}(1|0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо математичне сподівання } \mu(A_{реал}) > A_j^{(k)}, i \\ \left| \frac{\mu(A_{реал})}{A_j^{(k)}} \right|, & \text{якщо } \mu(A_{реал}) < A_j^{(k)}, \end{cases} \quad (3.16)$$

Під $A_{реал}$ в (3.15) і (3.16) в довільний момент часу усередині такту слід розуміти значення потужності оптичного сигналу, що проходить перед фотоприймачем. Тут передбачається, що приймальний вирішальний пристрій приймає рішення за амплітудою або є типом б) приймальних пристроїв [14, 31]. Якщо приймальний пристрій приймає рішення за рівнем енергії, яка пов'язана з амплітудою через тривалість такту: $E = A \cdot \Delta t$, тобто є типом а) приймальних пристроїв, то зазначені умовні ймовірності запропоновано шукати у вигляді:

$$PE_{lj, ex}^{(k)}(0|1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } E_{lj}^{(k)} < E_{lj}^{(k)}, i \\ \left| 1 - \frac{E_{lj}^{(k)} - E_{lj}^{(k)}}{E_{lj}^{(k)}} \right|, & \text{якщо } E_{lj}^{(k)} > E_{lj}^{(k)}, \end{cases} \quad (3.17)$$

$$PE_{lj, ex}^{(k)}(1|0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } E_{lj}^{(k)} > E_{lj}^{(k)}, i \\ \left| \frac{E_{lj}^{(k)}}{E_{lj}^{(k)}} \right|, & \text{якщо } E_{lj}^{(k)} < E_{lj}^{(k)}, \end{cases} \quad (3.18)$$

де $E_{lj}^{(k)}$ - енергія, прийнята в такті, підраховується шляхом підсумовування значень $A_{lj}^k \cdot \Delta t$ елементарної енергії, що надходить на фотоприймач в довільний момент часу тривалістю Δt всередині такту $E_{lj}^{(k)}$ - значення порогової енергії.

Далі, знаючи зважену суму межконцевих затримок T по мережі при передачі пакетів, які можна направляти по різних маршрутах, зі співвідношення (3.11), отримуємо середній час доставки повідомлення до абонента:

$$T_{\text{об}} = \nu \cdot T \cdot P_{\partial, \Sigma}(PE_{\Sigma}), \quad (3.19)$$

де ν - коефіцієнт, аналогічний використуваним в (3.12).

Таким чином, співвідношення (3.19) для $T_{\text{об}}$ і (3.12) для PE_{Σ} визначають базові показники якості роботи мережі, які нормовані в системах якості QoS і GoS відповідно і по яким можна зробити висновок про ефективність роботи мережі.

Надійність роботи системи передачі, про яку можна судити по ймовірності безвідмовної роботи Q , запропоновано характеризувати виходячи з параметра, пов'язаного з якістю доставки службового сигналу - J_T , що розраховується зі співвідношення (3.19). Якщо вважати, що відмова виникає в разі перевищення значенням J_T певного порогу J_T'' , що і призводить до збою, то

$$Q = \begin{cases} 0, \text{якщо } J_T > J_T'', i \\ \left| 1 - \frac{J_{T, lj}^{(k)}}{J_T''} \right|, \text{якщо } J_T < J_T'' \end{cases} \quad (3.20)$$

Відповідно до встановленої стандартом масці джитера, рис. 3.6, будемо вважати, що $J_T'' = 1.5\Delta t$. Тоді напрацювання на відмову T_Q до моменту часу з номером l для розглянутого сегмента може бути визначена: $T_Q = 1 \cdot \Delta t |_{(Q < Q'')}$, де Q'' порогове значення ймовірності безвідмовної роботи, при якій вже фіксується відмова.

Згідно відомим підходам до оцінки реальної працездатності мереж зв'язку [14, 31 та ін.], важливим показником є коефіцієнт готовності сегмента, пристрої, лінії. У розглянутій задачі коефіцієнт готовності сегмента (як ймовірність перебування його в працездатному стані) пропонується визначати:

$$K_{red lj}^{(k)} = \frac{J_{T, lj}^{(k)}}{J_T''} |_{t=l} \quad (3.21)$$

Коефіцієнт готовності всієї абонентської підмережі розраховується через твір вхідних компонентів [14]:

$$K_{redc,icl} = \sum \prod_j K_{redlj}^{(k)} \quad (3.22)$$

3.4 . Результати обчислювального експерименту по знаходженню оптимального сегмента для зіркоподібної PON

Обчислювальний експеримент був проведений за схемою рис. 3.2 після визначення всіх що там задаються величин: коефіцієнтів і функціональних залежностей.

Спочатку дослідження були проведені для схеми, що містить комутатори. Так як ставиться завдання отримати топологію з найбільшою кількістю каналів, а по відношенню до виду комутатора не встановлено будь-яких обмежень, то був обраний комутатор з найбільшою кількістю каналів, абсаме типу 1x16 [150]. Приймалися до розгляду також і всі інші моделі від 1x2 до 1x16. На підставі параметрів цих моделей, представлених в [29], були відповідно отримані фізичні коефіцієнти a_{kl} , b_{kl} , h_{kl} і s_{kl} , а також характеристики, що визначають відбиту хвилю в оптичній лінії. Передбачалося, що управління комутатора виконується параметрами самого ж сигналу, тобто комутатор є нереляційним [1]. В якості центрального зіркоподібного розгалужувача було вибрано пристрій [54], що допускає об'єднання значної (до 100) кількості каналів. Подальші дослідження проводилися для багоярусного включення комутаторів різних типів.

Розрахунки показали, що при збільшенні кількості ярусів спотворення в вихідному сигналі спочатку наростають повільно (приблизно до 4 -х ярусів), а далі досить суттєво, що пов'язано з різким зростанням відображеної хвилі. Появі останньої сприяють як самі комутатори, так і оптоволоконні сегменти між комутаторами. На рис. 3.8 представлена залежність сумарної ймовірності бітових помилок PE_{Σ} від кількості ярусів для комутаторів типу 1x8.

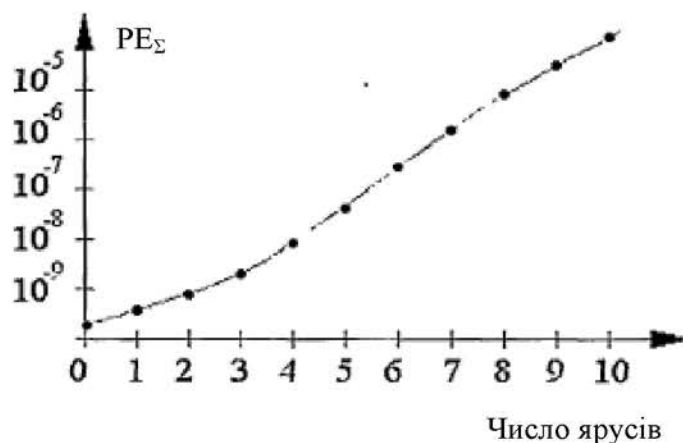


Рисунок 3.8. Ілюстрація залежності сумарної ймовірності бітових помилок PE_{Σ} від кількості ярусів для комутаторів типу 1x8

Видно, що в межах до 2-х -3-х ярусів ймовірність помилки є прийнятною при передачі по цифровому каналу даних. Цифровий голосовий трафік (VoIP) допустимо передавати навіть по 6-ти - 7-ми ярусній топології. Далі спостерігається істотне зростання ймовірності помилки, але створюється враження, що в області 10 -ти ярусів для PE_{Σ} почнеться стабілізація. Проте, таку кількість ярусів не може бути прийнято для побудови мережі, тому що значення $PE_{\Sigma} > 10^{-6}$ говорять про неприйнятність застосування каналу для цифрової передачі [14, 31]. Проведені аналогічні дослідження для випадку застосування різних комутаторів на багатоярусних схемах. На рис. 3.9 представлені результати розрахунків. Встановлено, що використання комутаторів з великою кількістю виходів призводить до більш значної помилки при тому ж числі ярусів, ніж з меншою кількістю виходів. Розрахунки показали, що комутатори типу 1x13... 1x16 можуть використовуватися тільки на одноярусних схемах. Більш цікавий результат отримано для наступної топології: якщо спочатку (на нульовому ярусі, тобто відразу після зіркоподібного розгалужувача, рис. 3.1) використовувати комутатор типу 1x2, а далі включати комутатор з удЧІчі меншою кількістю виходів, ніж у попередньому випадку, то ймовірність помилки істотно зменшується. Порівняння ілюструє крива 1 (1x2 + 1x8) і крива 3 (1x16) на рис. 3.9, а. Видно, що кількість каналів краще спочатку нарости-

ти ярусністю, а тільки в кінці (при необхідності) застосувати багатовихідний комутатор. Аналогічні результати представлені і на рис. 3.9, б.

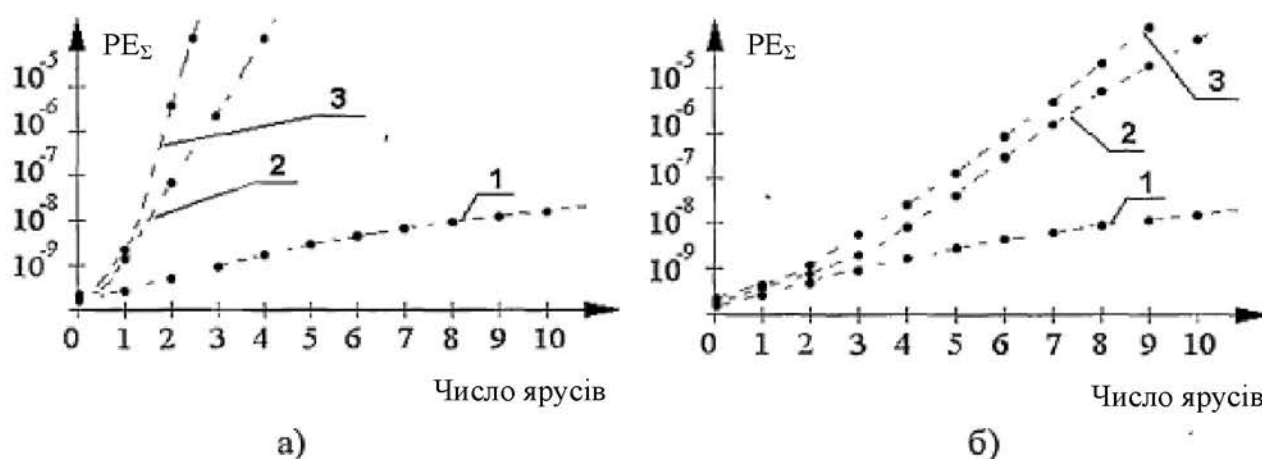


Рисунок 3.9. Ілюстрація залежності PE_{Σ} від кількості ярусів для різних комутаторів: а) - використовуються багатовиходові комутатори: 1 - система 1 x 2 на нульовому ярусі і далі 1x8; 2 - тип 1 x 14 і 3 - тип 1x16; б) - використовуються середньовихідні комутатори: 1 - система 1x3 на нульовому ярусі і далі 1x4 (тобто сумарно 1x12); 2 - тип 1x7 і 3- тип 1x8

Встановивши той факт, що застосування різномірних комутаторів дає кращий результат з точки зору ймовірності помилки, шляхом підбору при проведенні обчислювального експерименту була знайдена топологія комутаційної схеми, що забезпечує найбільшу кількість каналів з урахуванням того, що центральний зіркоподібний розгалужувач забезпечує 100 каналів. Топологія була знайдена за умови забезпечення $PE_{\Sigma} < 10^{-8} - 10^{-9}$. Розрахунки показали, що на нульовому ярусі (відразу після зіркоподібного розгалужувача) слід використовувати комутатор 1x2, далі - 1x3 і потім 1x6, рис. 3.10, тобто сумарно можна отримати 36 каналів на один центральний канал (що йде від зіркоподібного розгалужувача). Через те, що фізичні властивості центрального розгалужувача по відношенню до принципу об'єднання волокон, а отже - до кількості волоконних 14 каналів не враховувалися, очевидно, що останні не впливають на - користувальницькі характеристики

мережі. Це означає, що доцільно говорити не про сумарні кількості каналів всього на абонентському сегменті, а про їх питомі кількості, тобто припадають на один напрямок від центрального розгалужувача, або що знаходяться в, деякому кутовому секторі для випадку рівномірного розподілу зазначених каналів.

Визначивши найкращу топологію для комутаційної схеми, за кількістю каналів і допустиму по завадостійкості передачі, були виконані аналогічні дослідження - для OTDM - закінчення. У такій схемі не розглядався варіант ярусного включення - мультиплексорів, передбачалося, що збільшити кількість каналів можна тільки шляхом нарощування – виходу мультиплексора.

Але на відміну від попереднього випадку розрахунки відразу ж виявили особливість TDM-мультиплексування. Навіть якщо припустити, що мультиплексор є ідеально працездатним і не володіє будь-якими раптовими збійними режимами, то наявність тремтіння фази у вхідних модельованих сигналах (див. рис. 3.7) призводить до суттєвої помилки на виході при об'єднанні багатьох каналів. Такий параметр, як ДЧІ у вхідних сигналах володіє властивістю складання, і, результуюча девіація часового інтервала на виході виявляється досить істотною. На рис. 3.11 представлені графіки ДЧІ від кількості об'єднуючих каналів на обладнанні асинхронного TDM-мультиплексування сімейства Metro Ethernet.

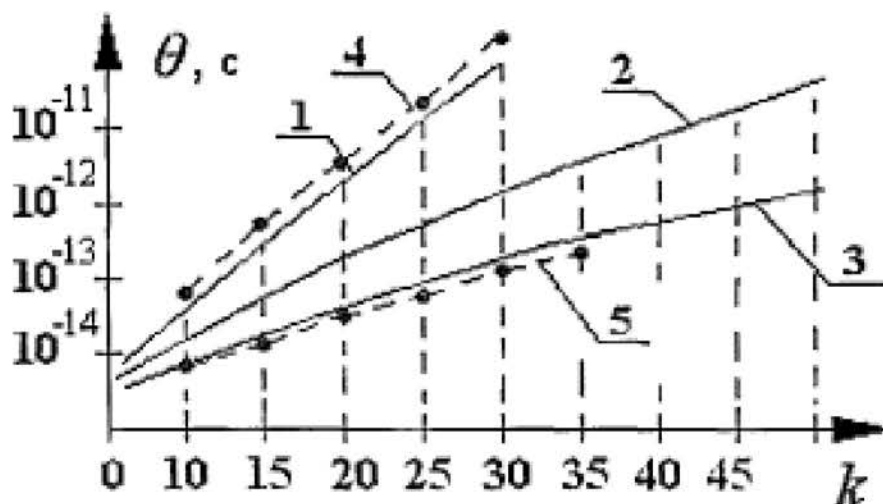


Рисунок 3.11. Графіки девіації часового інтервалу в об'єднаному сигналі в залежності від кількості вихідних каналів

Криві 4 і 5 на рис. 3.11 відрізняються відсутністю і наявністю, відповідно, додаткових синхронізуючих пристроїв. В останньому випадку забезпечується істотне зниження ДЧІ у вхідних сигналах, що позначається і на вихідному сигналі. Це ж враховується і при моделюванні (крива 3). Для побудови кривих 1 і 2 передбачалося наявність ДЧІ у вхідних сигналах. Істотна ДЧІ на виході в кінцевому результаті до того, що цифровий сигнал розташовується на зсунутих тактових інтервалах, відповідно, його зчитування вирішальним пристроєм значно ускладнюється. Цей факт, звичайно ж, позначається і на сумарну ймовірність бітових помилок, причому в більш сильному ступені, ніж вплив відбитої хвилі. На рис. 3.12 представлені результати розрахунків $PE_{\Sigma}(\theta)$ для різних факторів, що характеризують функціональність мережі.

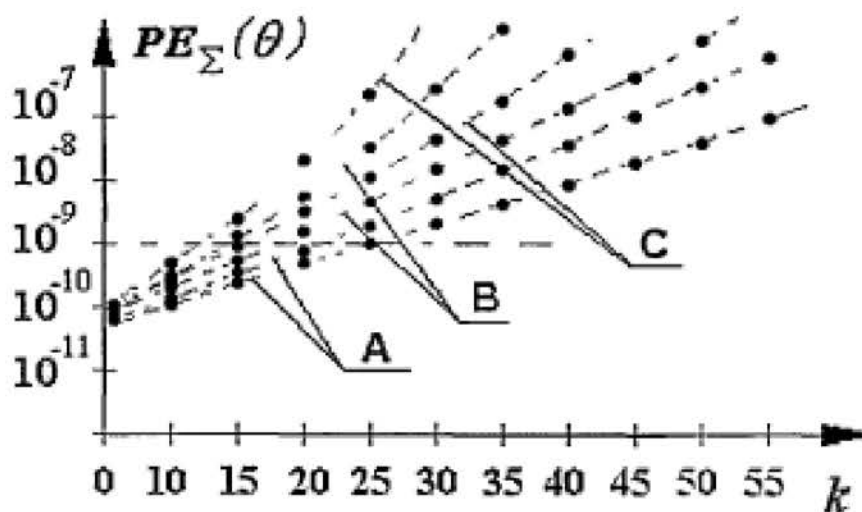


Рисунок 3.12. Ілюстрація графічних залежностей сумарної ймовірності помилки від ДЧІ для різних параметрів спотворень у вхідних сигналах: А - ДЧІ у вхідних сигналах мінімально і залишається на рівні допустимого джитера (наприклад, додатково з пристроєм OTDM використовується синхронізатор, відпов. кривої 3 на рис. 3.11); В - девіація часових інтервалів у вхідних сигналах в два рази менше «природної» 17, відпов. кривої 2 на рис. 3.11; С - ДЧІ у вхідних сигналах відповідає моделі по рис. 3.7, відпов. кривій 1 на рис. 3.11

Розрахунки показали, що застосування OTDM - схем без додаткових синх-

ронізуєтьох схем обмежується в межах 15 - 20 каналів, що, безумовно, поступатьох за ефективністю комутаційної схемою по рис. 3.10. навпаки, використання синхронізатора, переважної вхідний рівень ДЧІ, істотно підвищує завадостійкість OTDM - схем і робить їх застосування ефективніше приблизно до 45 - 50 каналів. Збільшення кількості каналів понад цього знову приводить до зростання ймовірності помилки, що, мабуть, пов'язано з наростанням технологічних затримок по фізичним причин (характеризуються коефіцієнтами a_{kl} , b_{kl} , h_{kl} і s_{kl}).

Таким чином, встановивши кращі параметри OTDM - схем, застосовуваних спільно з синхронізатором, в порівнянні з комутаційними схемами, виконано порівняльне дослідження цих «хороших» топологій по іншому показнику якості - часу доставки повідомлення до абонента. передбачалося, що абоненти (абонент 1 і абонент 2) можуть бути з'єднані декількома (не менше 2х) шляхами. Результати розрахунку $T_{аб}(k)$ представлені на рис. 3.13. У розрахунках, пов'язаних із затримкою сигналу в лінії передбачалося, що довжина оптоволоконного тракту між пристроями не перевищує 10 км, що є характерним для мереж міського масштабу. Передбачалося також, що повідомлення, передане абонентом, складається з єдиного «слова», рівного за довжиною тривалості пакета, а бітова швидкість в мережі становить 10 Мбіт/с для абонентського сигналу.

Розрахунки показали, що хоча схема з OTDM і володіє підвищеною тривалістю доставки повідомлень, але із збільшенням числа каналів це значення зростає не надто помітно. Проте, із збільшенням до > 65 4 - 70 параметр $T_{аб}$ стає неприйнятним: $T_{аб} > 10^{-3}$ с, що за протоколом Ethernet призводить до обриву з'єднання [18]. Комутаційні схеми навпаки - спочатку володіють кращими характеристиками (до $k \approx 35 - 40$), а потім починають програвати

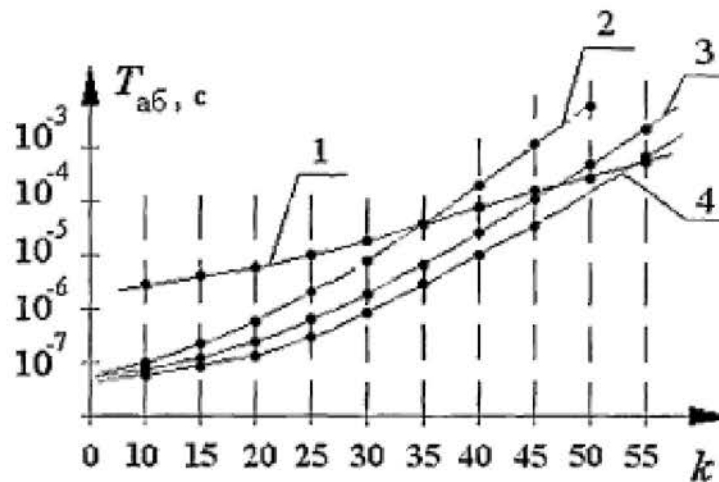


Рисунок 3.13. Ілюстрація залежностей часу доставки повідомлення до абонента від кількості каналів для розглянутих топологічних схем для випадку 3х можливих шляхів передачі трафіку: 1 - схема OTDM з синхронізатором; 2, 3 і 4 відповідають комутаційним схемами: 2 - схема з різномітними комутаторами, представлена на рис. 3.10, 3 - ярусне включення комутаторів типу 1x16 і 4 - ярусне включення комутаторів типу 1 x2 (для отримання того ж кількості каналів слід в даному випадку використовувати більше ярусів)

мультиплексорній топології. Це пов'язано, мабуть, з накопиченням затримок проходження сигналу. Крім цього встановлено, що «вигідна» за кількістю каналів і по PE_{Σ} схема (рис. 3.10) повільніше доставляє повідомлення, ніж одноманітні топології. Проте для $k \approx 36$, що було отримано вище, доставка повідомлення цілком прийнятна. Проте на основі розрахунків можна зробити висновок про те, що використання OTDM - схеми є ефективніше, оскільки вдається, забезпечити більшу кількість каналів у межах тих же значень PE_{Σ} і $T_{аб}$. Дослідження схем з великим 3^x шляхів передачі трафіку між абонентами. показало, що час доставки повідомлення тільки збільшується. А схеми з 2 - ма і 3 - ма шляхами розділення приблизно рівні. Далі були проведені дослідження з виявлення надійності для отриманих топологічних рішень. Так як в розробленій математичній моделі для показників надійності мережі (3.20)...(3.22) істотним фактором є джитер, що отримується службовим сигналом, можна говорити про залежність J_T від номера операції при

проходженні сигналу по мережі 1, що фактично є аналогом поточного часу. На рис. 3.14 і рис. 3.15 представлені графічні залежності для ймовірності безвідмовної роботи і коефіцієнта готовності абонентського сегмента для різних розрахункових випадків;

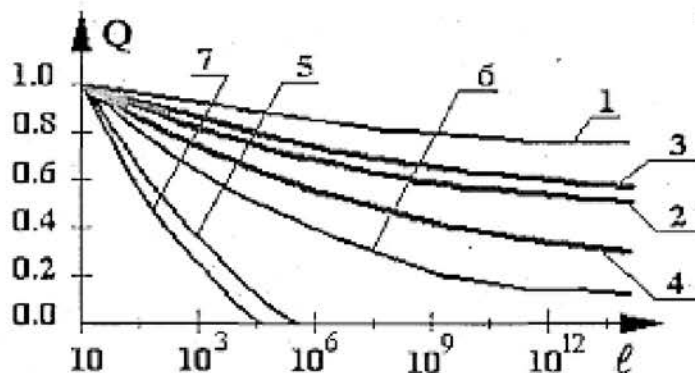


Рисунок 3.13. Зміна ймовірності безвідмовної роботи залежно від номера операції

1

Криві 1, 5, 6 і 7 - побудовані для схеми з OTDM; 2, 3 і 4 - для комутаційної схеми. Видно, що застосування синхронізатора (крива 1.) істотно підвищує безвідмовність роботи; крива 6 відповідає графіку 2 на рис. 3.11; 5 відповідає графіку 1 на рис. 3.11, а побудована для найгіршого з можливих випадків – девіація часових інтервалів у всіх сигналах складається (з одним знаком), що призводить до загального єдиного розмовності сигналів і досить швидко настає збій (відмову). Представлені на рис. 3.14 криві 2, 3 і 4 відповідають параметрам схеми і показникам (також графіки 2, 3 і 4) з рис. 3.13. видно, що схема з різнотипними комутаторами (з рис. 3.10), якій відповідає крива 2, володіє прийнятною безвідмовністю, але, тим не менш, поступається схемою з однотипними пристроями. Через те, що OTDM - схема має все ж кращі показники як по надійності і завадостійкості, так і за кількістю каналів, то для неї проведені дослідження коефіцієнта готовності сегмента від номера операції, рис. 3.15.

Таким чином обчислювальний експеримент показав, що багатоярусна комутаційна схема все ж поступається за параметрами схемі з OTDM- мультиплек-

суванням. Але для ефективної роботи останньої слід використовувати додатковий пристрій - синхронізатор. Дійсно, як показав аналіз літератури по мережах з мультиплексуванням [14, 31 та ін.], операцію мультиплексування неефективно застосовувати без додаткової системи синхронізації. Комутаційна схема не вимагає додаткової синхронізації, що робить її досить привабливою при побудові сегментів з невеликою кількістю каналів.

ВИСНОВКИ

Основоположним результатом магістерської роботи є досліджений підхід до модернізації PON - з застосування зіркоподібного розгалуджувача замість Y-подібного, що при використанні спільно з розробленим алгоритмом взаємодії вузлів - по λ -адресами, дозволяє в значній мірі змінити процеси, що відбуваються в мережі.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Досліджено метод підвищення ефективності функціонування сегмента пасивної оптичної мережі, який на відміну від традиційних методів побудови оптичних мереж заснований на використанні зіркоподібного розгалужувача на абонентській частині і нового протоколу взаємодії абонентів, що дозволяє розвантажити ресурси центрального (вищого) мережевого вузла в завданні взаємодії абонентів між собою, а також збільшити швидкість обробки інформації. Запропонований протокол передбачає взаємодію абонентів на основі їх λ -адрес з урахуванням найбільш імовірних їх поточних станів.

Встановлено, що при взаємодії на абонентському сегменті метод забезпечив можливість зниження часу доведення інформації до абонента до 10 разів. На основі розробленої моделі взаємодії абонентів за запропонованим протоколом отримані показники ефективності роботи запропонованого сегмента. Розроблено стратегії маршрутизації на такому сегменті і його оптимального масштабування за критерієм отримання найбільшої кількості λ -каналів за умови мінімізації числа перенастроювань обладнання.

2. Досліджено шляхи можливості збільшення кількості абонентських каналів на зіркоподібній оптичній мережі, який на відміну від традиційних засобів підвищення багатоканальності мереж заснований на застосуванні багатоярусного включення оптичних комутаторів типів від 1x2 до 1x16, а також застосування TDM-мультиплексування. Параметри схеми запропоновано розраховувати в результаті спільної оцінки ймовірності достовірного прийому повідомлення, ймовірності бітової помилки і часу доставки повідомлення до абонента. Що дозволило

отримати оптимальну топологію мережі за критерієм найбільшої кількості каналів за умови забезпечення якості передачі за системою стандартів QoS і GoS і при цьому зберегти ступінь вузлового з'єднання.

3. Досліджено метод визначення трафікових частин потоків і топології багато-і одноколійного графа, який на відміну від відомого забезпечує можливість спільного обліку випадкових величин пропускної здатності ліній мережевого графа, тривалостей очікування повідомлень в черзі і вплив зовнішніх спотворень (тривалості такту), що дозволяє знаходити оптимальні шляхи для передачі цифрових сигналів. Даний метод враховує особливості передачі сигналів службових підсистем, зокрема, сигналу протоколу RSVP, і передбачає оптимізацію за критерієм мінімізації джитера, а в разі передачі абонентських сигналів оптимізація проводиться по критеріям мінімальної зваженої суми міжкінцевих затримок повідомлень між довільною парою абонентів. Застосування методу дозволяє знизити ймовірність бітових помилок в 11...12 разів.

4. Представлено методику оцінки та підвищення значень показників надійності і завадостійкості системи телекомунікацій, заснована на статистичному моделюванні вхідних сигналів, реальних показників надійності і завадостійкості ліній мережевого графа і топологічних характеристик мережі, що дозволяє в рамках розроблених методів з визначення параметрів телекомунікаційних систем підвищувати ефективність функціонування абонентів у мережі доступу з мінімальним залученням ресурсів центральної станції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сайт Міжнародного Союзу Електрозв'язку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.itu.int>.
2. Sam Halabi Metro Ethernet. Part of the Networking Technology series. - Cisco Press, 2013. – 240 p.
3. Sam Halabi Gigabit Ethernet for Metro Area Networks. Part of the Networking Technology series. - Cisco Press, 2011. – 329 p.
4. Mukherjee B. Optical Communication Networks. - Mc.Graw-Hill, 2013. – 576 p.
5. Сети следующего поколения NGN / под ред. А.В. Рослякова. - М.: Эко-Трендз, 2008. - 424 с.
6. Теория электрической связи / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; Под ред. Д.Д. Кловского. - М.: Радио и связь, 1998.- 432с.
7. Стиффлер Дж.Дж. Теория синхронной связи. Пер. с англ. Б.С. Цыбакова под ред. Э.М. Габидулина. М.: Связь, 1975. - 486 с.
8. Слепов Н. Н. Синхронные цифровые сети SDH. — М.: Издательство Эко-Трендз, 2000. - 148 с.
9. Рекомендация МСЕ-Т G.822. Нормы на частоту управляемых проскальзываний на международном цифровом соединении. М.: ЦНТИ “Информсвязь”. - 1996. - 32 с.
10. Рекомендация МСЕ-Т G.825. Нормирование дрожания и дрейфа фазы в цифровых сетях, основанных на базе синхронной цифровой иерархии. М.: ЦНТИ “Информсвязь”. - 1997. - 41 с.
11. Колтунов М.Н., Рыжков А.В. Организация системы тактовой сетевой синхронизации на ведомственных и корпоративных цифровых сетях связи. // Электросвязь, № 7, 2001. - с. 21 - 25.
12. Современные компьютерные сети. 2-е изд. / В. Столлингс. — СПб.: Питер, 2003.-783 с.
13. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. - М.: Издательство Техносфера, 2003. - 512 с.

14. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы / Сборник статей под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. - М.: Издательство «Connect», 2000. - 376 с.
15. Гальярди Р. М., Карп И.И. Оптическая связь: Пер. с англ. / Под ред. А. Г. Шереметьева. - М.: Связь, 1978. - 424 с.
16. Рекомендация МСЕ-Т G.703. Физические и электрические характеристики иерархических цифровых стыков. М.: ЦНТИ «Информсвязь». - 1988. - 63 с.
17. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. - М.: Компания Сайрус-Системс, 1999. - 670 с.
18. Kaminov I.P. Optical Fiber Telecommunications: Components of Systems. - Boston: Academic Press, 2006. - 876 p.
19. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы: учебник для вузов. - М.: Горячая линия-Телеком, 2005. - 416 с.
20. Broeng J.A., Bjarklev A.S. Photonic crystal fibers. - Kluwer: Academic Publishers, 2003. - p. 266.
21. Agrawal G.P., Boyd R.W. Contemporary nonlinear optics. - Boston: Academic Press, 2002. - 478 p.
22. Бакланов И.Г. WDM/PDH/SDH/ATM: технология и практика измерений. - М.: Изд-во ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. - 348 с.
23. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 2-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. - СПб.: Питер, 2003. - 864 с.
24. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ - Санкт-Петербург, 2005. - 304 с.
25. Математические методы в теории надёжности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьёв. - М.: Наука, 1995. - 524 с.
26. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. - М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. - 267 с.
27. Шнепс М.А. Численные методы теории телетрафика. - М.: Связь, 1974. - 232 с.
28. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика. - 2-е изд. - М.:

- ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 512 с.
29. Матвеев А.Н. Оптика: Учеб. пособие для физ. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1985.-351 с.
30. J. Skidmore, E. Wolak, T. Strite. Advances in pump lasers enable low-cost, high-efficiency EDFAs. WDM Solutions, 2003.
31. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж, 2001. - 1296 с.
32. В. П. Дьяконов VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 384 с.
33. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.
34. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. - К.: Техніка, 2004. - 576 с.
35. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навчальний посібник / Є.М. Чернихівський. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. - 272 с.
36. О.И. Кутузов, Т.М. Татарникова Моделирование телекоммуникационных сетей [Электронный ресурс] // – Режим пу: <http://dvo.sut.ru/libr/ius/w101kutu/index.htm>