

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

на тему:

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ
08-34.МКР.007.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

_____ Мironov A.G.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ

_____ Городецька О.С.

« ____ » _____ 2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. каф. ЕНС

_____ Білинський Й.Й.

« ____ » _____ 2019 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Галузь знань 17– Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТКСТБ
к.т.н., професор Г.Г. Бортник
“ ___ ” _____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Миронову Артему Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення ефективності пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу

керівник роботи Городецька Оксана Степанівна, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” 10 2019 року № 254

2. Строк подання студентом роботи 02 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи 1. Кількість каналів передавання у волоконно-оптичній системі доступу – 64; 2. Ширина смуги групового сигналу – 8192 МГц; 3. Частотний інтервал між підносійними – 128 МГц; 4. Центральна довжина хвилі робочого діапазону системи передавання – 1550 нм; 5. Довжина стандартного одномодового оптичного волокна SSMF – 20 км; 6. Формат модуляції оптичного сигналу - 256-QAM; 7. Тип завадостійкого кодування лінійного сигналу – Ріда Соломона; 8. Коефіцієнт бітових помилок – 10^{-12} ; 9. Значення Q-фактору – 8,5 дБ; 10. Глибина оптичної модуляції канального сигналу – 0,04; 11. Тип мультиплексування каналів передавання – частотне; 12. Тип ущільнення в каналі передавання – OFDM.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сучасний стан і перспективи розвитку частотного поділу каналів у ВОСП; 2. Пряме фотодетектування оптичних сигналів із частотним розподілом каналів; 3. Приклади волоконно-оптичних мереж доступу з частотним розділенням каналів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Дуплексна система передачі із застосуванням частотного поділу підносійних каналів; 2. Структурна схема кільцевої волоконно-оптичної опорної мережі доступу; 3. Структурна схема одноволоконної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів; 4. Структурна схема центральної станції волоконно-оптичної мережі доступу; 5. Структурна схема високонадійної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів; 6. Структурна схема кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів за запитами; 7. Структурна схема вузла комутації мережі доступу; 8. Структурна схема FDM-PON-мережі; 9. Блок-схема трансиверів оптичної мережі доступу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Городецька О.С., доцент кафедри ТКСТБ		
Економічна частина	Кавецький В.В., старший викладач		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Березюк О.В. к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	06.09.2019р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	13.09.2019р.	
3.	Сучасний стан і перспективи розвитку частотного поділу каналів у ВОСП	04.10.2019р.	
4.	Пряме фотодетектування оптичних сигналів із частотним розподілом каналів	25.10.2019р.	
5.	Приклади волоконно-оптичних мереж доступу з частотним розділенням каналів	08.11.2019р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	15.11.2019р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	22.11.2019р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	29.11.2019р.	
9.	Нормоконтроль МКР	02.12.2019р.	
10.	Попередній захист МКР, рецензування МКР	06.12. 2019р.	
11.	Захист МКР ЕК	09.12. 2019р.	

Студент

(підпис)

Миронов А.Г.

Керівник роботи

(підпис)

Городецька О.С.

РЕФЕРАТ

УДК 621.391

Миронов Артем Геннадійович. Підвищення ефективності пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 122 с. На українській мові.

Рисунків 58, таблиць 11, бібліографія 82.

Розглянуто основні методи оптичної модуляції багатоканальними сигналами, що складаються з частотно-розділених каналів, основи частотного мультиплексування каналів, способи фотодетектування, способи передачі по одному волокну дуплексних багатоканальних сигналів. Виявлено переваги частотного поділу каналів в пасивних оптичних мережах доступу перед технологією тимчасового поділу каналів. Показано, що використання багаторівневих цифрових форматів модуляції при формуванні частотно-розділених каналів дозволяє збільшити швидкість передачі сигналів в мережі.

Результати імітаційного моделювання процесу оптичної модуляції в оптоелектронних компонентах при прямій і зовнішній модуляції і врахування впливу нелінійних характеристик цих компонент на показники якості сигналів дозволяють вибрати режими модуляції для забезпечення необхідної якості сигналів. Наведено апроксимуючі формули показників якості сигналів, які узгоджуються з результатами моделювання. Показана доцільність використання зовнішнього модулятора, що володіє більшою широкосмуговістю в порівнянні з лазерним діодом при прямій модуляції випромінювання.

Розглянуто кільцеві топології для організації опорних мереж і деревоподібної архітектури PON-мережі. Розроблено структурні схеми вузлів комутації каналів, призначених для користувача кінцевих пристроїв і принципи функціонування мереж. Проведено порівняння пропускну здатності PON-мережі з частотним поділом каналів з NG- PON2-мережею.

ABSTRACT

UDC 621.391

Mironov Artem Gennadiyovich. Increasing the efficiency of passive optical infrared access networks. Master's qualification work in the specialty "Telecommunications and Radio Engineering" - Vinnitsa: VNTU, 2019. - 122 p. In Ukrainian language.

Figures 58, tables 11, bibliography 82.

The basic methods of optical modulation of multichannel signals consisting of frequency-separated channels, the basics of frequency multiplexing of channels, methods of photo-detection, methods of transmitting duplicate multichannel signals on one fiber are considered. The advantages of frequency division of channels in passive optical access networks over time division technology are revealed. It is shown that the use of multilevel digital modulation formats in the formation of frequency channels allows to increase the speed of signal transmission in the network.

The results of simulation modeling of the optical modulation process in optoelectronic components with direct and external modulation and taking into account the influence of the nonlinear characteristics of these components on the signal quality indicators allow you to select modulation modes to ensure the required signal quality. The approximate formulas of the signal quality indicators, which are consistent with the simulation results, are presented. The expediency of using an external modulator with a higher bandwidth compared to the laser diode for direct radiation modulation is shown.

The circular topologies for the organization of the supporting networks and the PON-tree architecture are considered. Structural diagrams of the switching units of the channels intended for the user of the end devices and principles of functioning of the networks are developed. The PON bandwidth of the frequency division of channels with the NG-PON2 network is compared.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЧАСТОТНИЙ ПОДІЛ КАНАЛІВ У ВОСП - СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	15
1.1 Види оптичної модуляції і фотодетектування, формати модуляції в частотно-розділених каналах	15
1.2 Місце частотного поділу каналів в ВОСП	22
1.3 Висновки по першого розділу	28
2 ПРЯМЕ ФОТОДЕТЕКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ ЧАСТОТНИМ РОЗПОДІЛОМ КАНАЛІВ	30
2.1 Вибір параметрів фотоприймального пристрою для оптимального детектування підносійних сигналів.....	30
2.2 Пряме фотодетектування оптичних односмугових сигналів з частотним розподілом підносійних каналів різного формату модуляції.....	42
2.3 Висновки до другого розділу.....	52
3 ПРИКЛАДИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ З ЧАСТОТНИМ РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ	54
3.1 Архітектура волоконно-оптичних мереж доступу з частотним розділенням каналів	54
3.2 Відмовостійка кільцева опорна мережа, що використовує переприймання підносійних каналів в вузлах	57
3.3 Волоконно-оптична кільцева опорна мережа з комутацією підносійних каналів	66
3.4 Волоконно-оптична кільцева опорна мережа з комутацією піднесуть каналів за запитами	71
3.5 PON-мережі з частотним розділення каналів	75
3.6. Висновки до третього розділу	89
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	90
4.1 Розрахунок витрат на проведення МКР	90
4.2 Визначення коефіцієнта наукової значимості отриманих результатів науково-дослідної роботи	96
4.3 Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР	98
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	98

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	99
5.1 Виробнича санітарія та гігієна праці	99
5.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони.....	99
5.1.2 Виробниче освітлення	100
5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання.....	101
5.1.4 Виробничі випромінювання	101
5.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу .	103
5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць	103
5.2.2 Електробезпека.....	103
5.2.3 Пожежна безпека	103
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	104
5.3.1 Визначення області працездатності IP мережі в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	104
5.3.2 Визначення області працездатності IP мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу	106
5.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи IP мережі в умовах надзвичайних ситуацій.....	108
5.4 Висновки до п'ятого розділу	108
ВИСНОВОК.....	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	111

ВСТУП

Актуальність теми. Стратегія розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2017 - 2030 роки передбачає заходи, спрямовані на стимулювання розвитку цифрових технологій і їх використання в різних секторах економіки. Основною метою спрямування, що стосується телекомунікаційної інфраструктури, є розвиток мереж зв'язку, які забезпечують потреби економіки зі збору та передачі даних держави, бізнесу і громадян з урахуванням технічних вимог, що пред'являються до цифрових технологій. Стосовно до мереж доступу в стратегії розвитку до 2024 року заплановано досягнення частки домашніх господарств, що мають широкосмуговий доступ до мережі «Інтернет» в загальній кількості домашніх господарств - 97 відсотків, причому швидкість передачі повинна скласти 100 Мбіт / с, а також забезпечення стійкого покриття мережами 5G всіх великих міст з чисельністю населення 1 млн. чоловік і більше.

Основний напрямок розвитку мереж доступу - цифровізація і збільшення швидкості передачі сигналів з метою надання користувачам комплексу послуг, включаючи інтерактивну цифрову високошвидкісну зв'язок і послуги сверхширокополосного мультимедіа. Необхідно відзначити великий внесок в теоретичні та прикладні аспекти планування мереж доступу ЛО ЦНДІЗ і вчених, серед яких Б. С. Гольдштейн, І. Е. Нікульское, Н. А. Соколов та ін. [1]. Запропоновані ними рішення побудови мереж доступу, досить економічні і орієнтовані на застосування оптоелектронних компонент, доступних на вітчизняному ринку.

В даний час спостерігається «вибуховий» попит на мультимедійні послуги, а в майбутньому - на надширокосмугові послуги, такі як послуги ультра якісного телебачення в форматі 3D. Динамічно розвиваються послуги «Хмарних» обчислень і зберігання інформаційного контенту, а також стрімке зростання бездротових методів передачі і все великі запити на пропускну здатність мереж вимагають швидких і ефективних рішень для забезпечення зростаючих інформаційних потреб, що призводить до зближення і конвергенції бездротових і дротових мереж. Також необхідно враховувати нові напрямки розвитку телекомунікаційних і інформаційних систем, наприклад технологію M2M (machine-to-machine), або по-іншому IoT (Internet of things - «Інтернет речей») [2]. За прогностичним оцінками в доступній для огляду перспективі кількість пристроїв класу M2M буде істотно більше, ніж кількість людей, що населяють нашу планету. Очікується, що термінали M2M передаватимуть відеоінформацію. Обмін

цією інформацією між терміналами буде здійснюватися по мережах доступу. Зростає роль мереж доступу в забезпеченні телекомунікаційними послугами бізнес користувачів, великих підприємств і операторів бездротового зв'язку, що вимагають швидкісну симетрію в напрямках передачі. Важливою вимогою є гарантоване виділення ресурсів мережі доступу кожному з споживачів послуг.

За прогнозами аналітиків, існуючі мережі доступу в найближчому майбутньому не зможуть справлятися з швидкозростаючим трафіком, тому що в призначеному для користувача сегменті очікується зростання швидкостей передачі даних: 250 Мбіт/с до 2028 року і 1 Гбіт/с до 2030 року. Перед телеком-операторами стоїть актуальне завдання - нарощування пропускної здатності наявних у них мереж доступу без надмірних витрат на їх реконструкцію.

У діючих сьогодні мережах доступу широкого поширення набули пасивні оптичні мережі (PON - passive optical network) на основі технології GPON (gigabit-capable PON). Існуючі технології, що базуються на останніх рекомендаціях ITU-T, дозволяють «еволюціонувати» від вже функціонуючих мереж GPON, до мереж наступного покоління з більшою сумарною швидкістю передачі сигналів, наприклад XG-PON [3] і NG-PON2 [4]. У всіх цих мережах дуплексний зв'язок по одному волокну забезпечується за допомогою технології спектрального поділу сигналів (WDM - wavelength division multiplexing) для низхідного і висхідного напрямки, що є різновидом частотного поділу каналів в оптичному діапазоні. У висхідному напрямку смуга пропускання середовища динамічно розподіляється між користувачами послуг за допомогою технології множинного доступу з поділом за часом (TDMA - time division multiple access). Останнє покоління NG-PON2-мереж поєднує ці дві технології в одну під загальною назвою TWDM-PON. Безсумнівною перевагою перерахованих мереж є продумане компромісне розподіл оптичних діапазонів для одночасного функціонування обладнання різних поколінь в розгалуженій оптичній інфраструктурі. Однак, подальший розвиток NG-PON2-мереж обмежується технічним межею можливостей технології TDMA при сучасних вимогах до якості обслуговування сигнальних потоків в режимі реального часу. Динамічний розподіл ресурсів оптичного волокна між кінцевими пристроями не дозволяє гарантувати безперервність і «широкосмуговість» послуги, що надається із заданою швидкістю передачі і вимагає постійного моніторингу завантаження мережі. У призначених для користувача кінцевих пристроях застосовуються досить дорогі і складно-функціональні перебудовувані оптичні джерела

випромінювання, інтегровані з оптичними модуляторами і мультиплексорами. Перебудова довжини хвилі джерела випромінювання і подальший контроль стану випромінювання вимагають спеціальних повідомлень і протокольних даних. Ці сигнали передаються в діапазоні довжин хвиль, використовуваних іншими кінцевими пристроями, що вимагає передбачити заходи для запобігання порушенню функціонування мережі. Для перебудови довжини хвилі в призначеному для користувача крайовому пристрої в залежності від використовуваних оптичних компонент і завантаження мережі потрібно від сотні наносекунд до секунди. Компонентна база деяких кінцевих пристроїв передбачає компенсацію дисперсійних спотворень сигналу. У всіх оптоелектронних компонентах в NG-PON2-мереж використовуються звичайні імпульсні методи формування сигналів, що не дозволяє ефективно використовувати весь радіодіапазон частот, а також унеможливорює «безпосередню» доставку ширококутових радіосигналів без додаткових перетворень, наприклад сигналів від базових станцій операторів бездротових мереж.

Аналіз різних технологій мультиплексування на предмет відсутності зазначених в NG-PON2-мережах недоліків, в основному пов'язаних з сутністю технології TDMA показав, що найбільш придатною є технологія на основі використання частотного поділу каналів не тільки в оптичному діапазоні, але і в радіодіапазоні. Найвніше обладнання, яке працює в радіодіапазоні, має більш привабливі параметри по стабільності генераторів, можливостям фільтрації і модуляції сигналів в порівнянні з обладнанням оптичного діапазону. Відкриваються широкі можливості організації дуплексних каналів не тільки в оптичному діапазоні, але і в радіодіапазоні. При цьому всім користувачам надаються ширококутові послуги з гарантованою швидкістю передачі в обох напрямках. Необхідність в синхронізації і протоколах передачі відпадає, канали стають «прозорими».

Початком практичного використання в світі оптичних систем передачі з частотним поділом каналів в радіодіапазоні вважається середина 90-х років ХХ століття. Відзначимо, що спочатку в каналах передавалися аналогові сигнали і, зокрема, аналогові сигнали телевізійного мовлення. Значний внесок у теорію і практику таких систем передачі внесли G. P. Agrawal, K. W. Cheung, T. E. Darcie, P. M. Hill, F.V.C. Mendis, R. Minasian, R. Olshansky, A. A. M. Saleh, W. I. Way [5-9].

Останнім часом відбувається своєрідний ренесанс частотного поділу каналів, як в радіодіапазоні, так і в оптичному діапазоні, де канали формуються за допомогою сучасних методів цифрової модуляції і обробки

даних. Дослідження з даної тематики активно тривають. Досить багато робіт присвячено питанням збільшення сумарної швидкості передачі сигналів в магістральних мережах за допомогою хвильового поділу каналів в оптичному діапазоні, як з прямим, так і з когерентним фотодетектуванням на прийомі. Опису функціонування таких систем в різних режимах роботи, практичного інженерного аналізу, питань математичного моделювання присвячені роботи В. А. Конишева, А. В. Леонова, О. Є. наний, Н. Н. Слепова, М. А. Слепцова, В. Н. Трещікова, Р . Р. Убайдуллаева, М. П. Федорука та інших авторів [10-16].

У 1999 році автором була захищена кандидатська дисертація на тему «Дослідження і розробка волоконно-оптичних систем передачі з ущільненням піднесуть і спектральним ущільненням» [17], в якій зроблено акцент на перевазі методів частотного поділу каналів, як в радіочастотному, так і в оптичному діапазоні перед методами тимчасового поділу каналів. У МКР продовжені дослідження з даної тематики з урахуванням сучасного стану і перспектив розвитку мереж доступу. Близькими за сутністю до досліджуваної теми є роботи [18].

Для більш повного використання переваг пасивних оптичних мереж доступу з частотним поділом каналів необхідно з єдиних позицій розробити теоретичні передумови для оцінки показників якості сигналів, сформованих за допомогою сучасних методів модуляції. Необхідний поглиблений аналіз усіх факторів, що призводять до спотворень сигналу, як в приймально-передавальних оптичних компонентах, так і в оптичному волокні, що знижують пропускну здатність мережі. Наявність ефективних методик моделювання процесів на окремих ділянках оптичних мереж доступу з частотним поділом каналів, що мають необхідний ступінь свободи у виборі параметрів для забезпечення необхідних критеріїв якості сигналу, спрощують розробку оптичного тракту в цілому і забезпечують оптимальний вибір параметрів компонент цих мереж.

Об'єктом дослідження МКР є пасивні оптичні мережі доступу, що представляють собою складову частину мультисервісної мережевої інфраструктури.

Предметом дослідження є комплекс методів аналізу спотворень і оцінки показників якості сигналів в пасивних оптичних мережах доступу з частотним поділом каналів, як в оптичному діапазоні, так і радіохвиль.

Мета роботи. Метою МКР є науково-обґрунтоване рішення проблеми збільшення швидкості передачі сигналів в мережах доступу, шляхом застосування частотного поділу каналів в оптичному та радіочастотний

діапазонах, розробка теоретичних положень, методик та моделей для розрахунку показників якості сигналів з різними форматами модуляції в різних режимах функціонування оптичного тракту, а також розробка структурних схем вузлів і мереж доступу.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети в МКР послідовно вирішуються наступні завдання:

1. Аналіз особливостей застосування частотного поділу каналів в радіодіапазоні частот з подальшим перенесенням отриманого багатоканального сигналу в оптичний діапазон, подальшого оптичного мультиплексування і передачі по оптичному тракту з прямим фотодетектуванням на приймальній стороні.

2. Розробка імітаційних моделей для дослідження впливу нелінійних характеристик оптоелектронних модулів при модуляції і детектуванні багатоканального сигналу з частотно-розділеними каналами різних форматів модуляції.

3. Визначення оптимальних параметрів оптичних пристроїв для прийому багатоканальних сигналів з частотним поділом каналів різних форматів модуляції.

4. Дослідження спотворень, що виникають через дисперсійних властивостей оптичного волокна і розробка математичної моделі для оцінки цих спотворень в частотно-розділених каналах різних форматів модуляції.

5. Дослідження спотворень сигналів в частотно-розділених каналах різних форматів модуляції, викликаних нелінійними явищами в оптичному волокні: чотирьох хвильового зміщення (ЧХЗ), фазової самомодуляції (ФСМ) і фазової крос-модуляцією (ФКМ), вимушеним комбінаційним розсіюванням (ВКР); розробка математичних моделей для оцінки їх впливу на сигнали.

6. Розробка і дослідження структурних схем опорних оптичних мереж і PON-мережі з частотним поділом каналів.

Наукова новизна роботи. Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Запропоновано і обґрунтовано комплекс нових математичних моделей і на їх основі створені імітаційні програми для оцінки впливу на показники якості сигналу нелінійних характеристик оптоелектронних компонент: ватт-амперної характеристики лазерного діода; перехідною характеристики лазерного діода; передавальної характеристики зовнішнього модулятора на основі інтерферометра Маха-Цандера. Розроблені математичні моделі відрізняються від відомих тим, що вони мають необхідні ступені свободи, як у виборі параметрів оптоелектронних компонент, так і у

виборі параметрів модулюючого групового багатоканального сигналу, що складається з частотно розділених каналів.

2. Запропоновано математичну модель передачі багатоканального сигналу по дисперсійному оптичному тракту, заснована на гармонійному аналізі. Модель дозволяє оцінити ступінь спотворення сигналів в залежності від параметрів оптичного волокна і параметрів багатоканального сигналу при прямому детектуванні оптичного сигналу. Модель відрізняється від відомих тим, що враховуються реальні умови функціонування оптичного тракту, типові для мереж доступу наступного покоління з частотним поділом каналів.

3. Розроблено математичні моделі для розрахунку спектрального розподілу шумів биття і оцінки їх впливу на сигнали різних форматів модуляції при прямому детектуванні оптичного сигналу, засновані на гармонійному аналізі і дискретних властивостях продуктів шумів биття. Отримано невідомі раніше аналітичні співвідношення, що дозволяють передбачити ступінь погіршення якості сигналу в індивідуальних каналах, що робить можливим на апаратно-програмному рівні реалізувати адаптаційні механізми управління швидкістю передачі сигналів в індивідуальних піднесутих каналах, схильних до шумів биття або обґрунтовано застосувати методи завадостійкого кодування для досягнення необхідних показників якості сигналів.

4. Розроблено прикладне програмне забезпечення для оцінки спектрального розподілу комбінаційних частотних продуктів, що виникають в оптичному волокні через чотирьох хвильового зміщення, що дозволяє розрахувати показник якості сигналу в оптичних каналах. Запропоновано розміщення дуплексних каналів в двох оптичних діапазонах, що дає можливість мінімізувати вплив чотирьох хвильового зміщення, і спрощує реалізацію двостороннього зв'язку по одному волокну.

5. Розроблено новий спосіб вимірювання відношення сигналу до шуму при чотирьох хвильового зміщення в волоконно-оптичних мережах доступу з частотним поділом каналів, який може бути покладений в основу вимірювального обладнання, вбудованого в систему передачі з частотним поділом каналів.

6. Розроблено методики для оцінки комплексного впливу на показники якості сигналів різних форматів модуляції нелінійних явищ, що виникають в оптичному волокні: чотирьох хвильового зміщення, фазової самомодуляції і фазової крос-модуляції, вимушеного комбінаційного розсіювання. Показано, що кількість тих, що піднесутих каналів з фазовими форматами модуляції

обмежується явищем чотирьох хвильового зміщення, а для амплітудно-фазових форматів модуляції - явищем фазового крос-модуляції. При великому числі оптичних каналів у волокні (більше 160), до цих обмежує явищ додається вимушене комбінаційне розсіювання.

7. Вперше сформульовані науково-обґрунтовані принципи функціонування пасивних волоконно-оптичних мереж доступу наступного покоління, що відрізняються від існуючих тим, що канали формуються як в оптичному діапазоні, так і в радіохвиль; канали незалежні один від одного, при цьому забезпечується надання послуг з різними швидкостями передачі в кожному каналі; в деяких випадках відсутня перетворення сигналів, не потрібні протоколи або схеми синхронізації. Розроблено оригінальні структурні схеми опорних оптичних мереж, PON- мереж з частотним поділом каналів, а також вузлів і кінцевих пристроїв. Показано, що за допомогою частотного поділу каналів, як в оптичному діапазоні, так і в електричному можна домогтися багаторазового збільшення сумарної швидкості передачі сигналів в існуючих мережах доступу. Наприклад, для одного «дерева» PON-мережі загальна швидкість передачі сигналів може перевищити кілька Тбіт / с. У запропонованій PON-мережі швидкість передачі в перерахунку на одного користувача може в 16 разів перевищити аналогічну швидкість передачі в традиційних PON-мережах.

Теоретична значимість. Теоретична значущість МКР полягає в розвитку теорії волоконно-оптичних систем передачі з частотним поділом каналів, одночасно використовують як радіо, так і оптичний діапазони.

Практична значимість. Практична значимість МКР полягає в створенні науково-обґрунтованих рекомендацій щодо розрахунку параметрів волоконно-оптичних систем передачі з частотним поділом каналів, а також рекомендацій з проектування та розробки нових оптичних мереж доступу з різною топологією. Проведені дослідження і розроблені методики можуть бути використані для вирішення завдань по насиченню ринку ємними і гнучкими мультисервісними телекомунікаційними системами, а також, фізичного моделювання волоконно-оптичних трактів і їх компонентів при різній завантаженні мережі. Запропоновані методики розрахунку показників якості сигналів дозволять забезпечити єдиний підхід до проектування, обслуговування та експлуатації обладнання оптичних мереж з частотним поділом каналів, що в свою чергу призведе до уніфікації обладнання та підвищенню якості обслуговування користувачів мережі.

Методи дослідження. У МКР застосовані методи імітаційного моделювання з використанням середовища візуального програмування

Delphi і обчислювальної середовища Mathcad, методи теорії диференціального й інтегрального числення, метод гармонійного аналізу і швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

Реалізація та впровадження результатів досліджень. Отримані результати використані в НДР, виконуваних ФГБОУ ВО «СіБГУТІ» в рамках державного завдання № 084-0005-18 ПР, впроваджені в АТ «Діпрозв'язок-4» при розробці способів і методик розрахунків наступного покоління PON-мереж, використані в науково-дослідних і дослідно-конструкторських роботах ТОВ «Підприємство» Елтекс ».

Результати МКР використовуються в навчальному процесі на кафедрі багатоканального електричного зв'язку і оптичних систем ФГБОУ ВО «СіБГУТІ», а саме:

- моделює програма, що дозволяє досліджувати перехідні процеси в напівпровідникових лазерних діодів на резонаторах Фабрі-Перо [10];
- моделює програма, що дозволяє досліджувати нелінійні частотні складові, що виникають в спектрі лазерного діода при модуляції багатоканальним сигналом [48];
- моделює програма, що дозволяє досліджувати процес модуляції лазерного діода багатоканальними сигналами формату 64/256-QAM [49];
- моделює програма, що дозволяє досліджувати нелінійні частотні складові, що виникають в спектрі зовнішнього модулятора на основі інтерферометра Маха-Цандера при модуляції багатоканальним сигналом;
- моделює програма, що дозволяє досліджувати розподіл частотних складових, що виникають через чотирьох хвильового зміщення в чотирьох хвильового зміщення на сигнали при реалізації двостороннього зв'язку по одному волокну.

Вперше запропоновано оригінальний спосіб вимірювання відношення сигналу до шуму чотирьох хвильового зміщення в волоконно-оптичних мережах доступу з частотним поділом каналів. Рішенням технічної проблеми є науково-обґрунтована оцінка потужності шуму чотирьох хвильового зміщення в каналах шляхом передачі через оптичне волокно замість реального багатоканального сигналу 4-канального сигналу. Дане рішення дозволить створити вимірювальну апаратуру для оцінки завадостійкості оптичних трактів мереж доступу з частотним поділом каналів.

Методика розрахунку показника якості сигналів з різними форматами модуляції при нелінійних явищах в оптичному волокні. Виведені аналітичним шляхом висловлення для оцінки в індивідуальних піднесуть

каналах сумарного вкладу шумів чотирьох хвильового зміщення, фазової самомодуляції і фазової крос-модуляції і вимушеного комбінаційного розсіювання спільно з посиленням спонтанним шумом оптичного підсилювача дозволяють оптимально вибрати рівень потужності оптичних передавальних модулів в залежності від кількості каналів і використовуваних каналних форматів модуляції.

Структура і обсяг роботи. МКР складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг МКР 353 сторінки, включаючи 128 малюнків, 7 таблиць, список літератури з 252 найменувань. У додатку до МКР наведені основні фрагменти вихідних кодів програм в середовищі візуального програмування Delphi, проміжні математичні викладки, приклади розрахунків в обчислювальному середовищі Mathcad і документи, що підтверджують впровадження основних результатів МКР.

Зміст магістерської кваліфікаційної роботи. У вступі відзначено актуальність теми МКР, представлені прогностичні вимоги до майбутніх мереж доступу, сформульовані мета і завдання МКР, перераховані основні наукові результати, їх практична цінність.

Розділ 1 МКР присвячений сучасному стану технології частотного поділу каналів в ВОСП. Розглянуто основні методи оптичної модуляції багатоканальними сигналами, що складаються з частотно-розділених каналів, основи частотного мультиплексування каналів, способи фотодетектування, способи передачі по одному волокну дуплексних багатоканальних сигналів. Виявлено переваги частотного поділу каналів в пасивних оптичних мережах доступу перед технологією тимчасового поділу каналів. Показано, що використання багаторівневих цифрових форматів модуляції при формуванні частотно-розділених каналів дозволяє збільшити швидкість передачі сигналів в мережі.

У розділі 2 представлені результати імітаційного моделювання процесу оптичної модуляції в оптоелектронних компонентах при прямій і зовнішньої модуляції і вплив нелінійних характеристик цих компонент на показники якості сигналів. Результати моделювання дозволяють вибрати режими модуляції для забезпечення необхідної якості сигналів. Наводяться апроксимуючі формули показників якості сигналів, які узгоджуються з результатами моделювання. Показана доцільність використання зовнішнього модулятора, що володіє більшою широкосмуговістю в порівнянні з лазерним діодом при прямій модуляції випромінювання.

Розділ 3 присвячений вибору оптимальних параметрів фотоприймального пристрою. Розглянуто процес фотодетектування оптичного сигналу, що містить частотно-розділені канали різних форматів модуляції. Особливу увагу приділено статистичному аналізу процесу фотодетектування односмугового оптичного сигналу, виведені розрахункові формули для оцінки якості багатоканальних сигналів при прямому фотодетектуванні.

У розділі 4 представлені математичні моделі, що дозволяють розрахувати показники якості багатоканальних сигналів в дисперсионном волоконно оптичному лінійному тракті з прямим фотодетектуванням, при поширенні по волокну двосмугового або однополосного оптичного сигналу. Моделі засновані на використанні гармонійного аналізу сигналів.

Розділ 5 присвячений аналізу нелінійних явищ, що виникають в оптичному волокні при організації частотно-розділених каналів. Розглянуто нелінійні спотворення сигналів через чотирьох хвильового зміщення, фазової самомодуляції і фазової крос-модуляції і вимушеного комбінаційного розсіювання. Розроблено моделі, що дозволяють розрахувати спектральний розподіл комбінаційних частотних складових при чотирьох хвильового зміщення і оцінити їх вплив, як на оптичні канали, так і на канали, розміщені в радіодіапазоні. Розроблено новий, ефективний метод визначення якості сигналів при впливі на них чотирьох хвильового зміщення, який може бути використаний в апаратно-програмному комплексі системи передачі для управління рівнем потужності оптичних передавальних модулів при заданих вимогах до якості сигналу. Розроблено методики розрахунку якості сигналів при комплексній дії нелінійних явищ на канали.

У розділі 6 наведено приклади структурних схем пасивних мереж з частотним поділом каналів. Розглядаються кільцеві топології для організації опорних мереж і деревоподібна архітектура PON-мережі. Розроблено структурні схеми вузлів комутації каналів, призначених для користувача кінцевих пристроїв і принципи функціонування мереж. Проводиться порівняння пропускнує спроможності PON-мережі з частотним поділом каналів з NG-PON2-мережею.

1 ЧАСТОТНИЙ ПОДІЛ КАНАЛІВ У ВОСП - СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

1.1 Види оптичної модуляції і фотодетектування, формати модуляції в частотно-розділених каналах

При частотному поділі каналів частотна смуга пропускання середовища передачі ділиться на деяке число смуг, в яких формуються канали. Якщо смуга частот відповідає вікнам прозорості оптичного волокна і канали формуються в оптичному діапазоні частот, то таке спектральне розділення каналів прийнято вважати мультиплексуванням довжин хвиль (WDM - wavelength division multiplexing). Останні досягнення в розробці волоконно оптичної компонентної бази дозволяють розміщувати оптичні канали щільно, звідси більш сучасне позначення мультиплексування (DWDM - dense WDM). Еквівалентний частотний інтервал між каналами регламентується ІТУ-Т (International Telecommunication Union - Telecommunication sector) і може становити 100 ГГц, 50 ГГц, 25 ГГц, 12,5 ГГц [59]. Згідно з рекомендаціями ІТУ-Т в DWDM системах використовуються вікна прозорості волокна в *C* (тисяча п'ятсот двадцять п'ять ... 1 565 нм) і *L* (1570 ... 1610 нм) діапазонах. Залежно від частотного інтервалу між оптичними каналами в кожному з цих діапазонів можна розмістити від 40 до 360 каналів в *C* діапазоні і до 560 каналів в *L* діапазоні. Реальне комерційно доступне обладнання сьогодні підтримує більше 80 каналів. Широке поширення отримали впорядковані хвильове решітки (AWG - arrayed waveguide grating). Ці пристрої широко застосовуються в сучасних ВОСП, випускаються у вигляді готових модулів, мають велику щільність розміщення каналів в певному вікні прозорості оптичного волокна, відрізняються малими втратами і габаритами [9]. Очевидно, що малий частотний інтервал між каналами вимагає високостабільних джерел випромінювання і прецизійних оптичних мультиплексорів. Розподілом величезної смуги пропускання оптичного волокна на певні, відносно невеликі частини, в кожній з яких будуть передаватися сигнали оптичних каналів, досягається одночасна передача і прийом, а також ефективне використання всієї смуги пропускання волокна [10]. Однак, зі збільшенням щільності каналів, в системах з DWDM повинні використовуватися гетеродинні методи оптичного детектування або точна фільтрація каналів, яка призводить до ускладнення обладнання і збільшення цін на нього.

Однак історично склалося, що в телекомунікації, наприклад в області провідних або безпроводних систем зв'язку використовуються методи частотного розділення каналів в електричній частині спектра, тобто в радіочастотному (РЧ) діапазоні. Часто такий метод ущільнення каналів в РЧ діапазоні називають ущільненням/мультиплексуванням піднесуть (SCM - subcarrier multiplexing). Стосовно до ВОСП, при SCM інформаційні сигнали зі швидкістю передачі B (від англ. Baseband), спектр яких знаходиться в низькочастотній (НЧ) області модулюють підносійні частоти в модуляторах (Мод), таким чином, створюються підносійні канали, а після підсумовування піднесуть каналів формується багатоканальний сигнал в РЧ діапазоні. Сформований багатоканальний сигнал «переноситься» в оптичний діапазон за допомогою оптичного модулятора, налаштованого на певну довжину хвилі [13].

У ВОСП найчастіше використовують два види модуляції: пряму модуляцію і зовнішню модуляцію. При прямій модуляції багатоканальний сигнал впливає безпосередньо на струм накачування лазерного діода (ЛД), на виході якого отримуємо оптичний сигнал, модульований за інтенсивністю. На рис. 1.1 схематично показана пряма модуляція випромінювання ЛД багатоканальним сигналом, що складається з частотно-розділених каналів, сформованих в РЧ діапазоні з центральними частотами $f_1, \dots, f_i, \dots, f_N$.

Вимоги на характеристики ЛД при прямій модуляції повинні забезпечити достатню лінійність ват - амперної характеристики (ВАХ), вузьку смугу і стабільність випромінювання, гладку модуляційну характеристику в широкому діапазоні частот, велику оптичну потужність випромінювання і т.д. [3-6, 17]. Безсумнівним достоїнством прямий модуляції є простота реалізації і економічні рішення особливо в схемних рішеннях обладнання призначеного для користувача класу, що важливо для мереж доступу. З іншого боку вихідний спектр ЛД двосмуговий (DSB - double-sideband). При модуляції випромінювання ЛД за інтенсивністю майже половина оптичної потужності сконцентровано на несучої частоті f_0 , яка не містить ніякої інформації про модульований сигнал. Інша половина потужності ділиться порівну між двома бічними частотними смугами, які представляють собою дзеркальне відображення одне одного в частотній області. Якщо врахувати, що оптична потужність в бічних смугах в свою чергу ділиться між підносійними каналами, то зі збільшенням кількості піднесуть каналів потужність, що виділяється на один канал, зменшується, що погіршує енергетичний бюджет в перерахунку на канал.

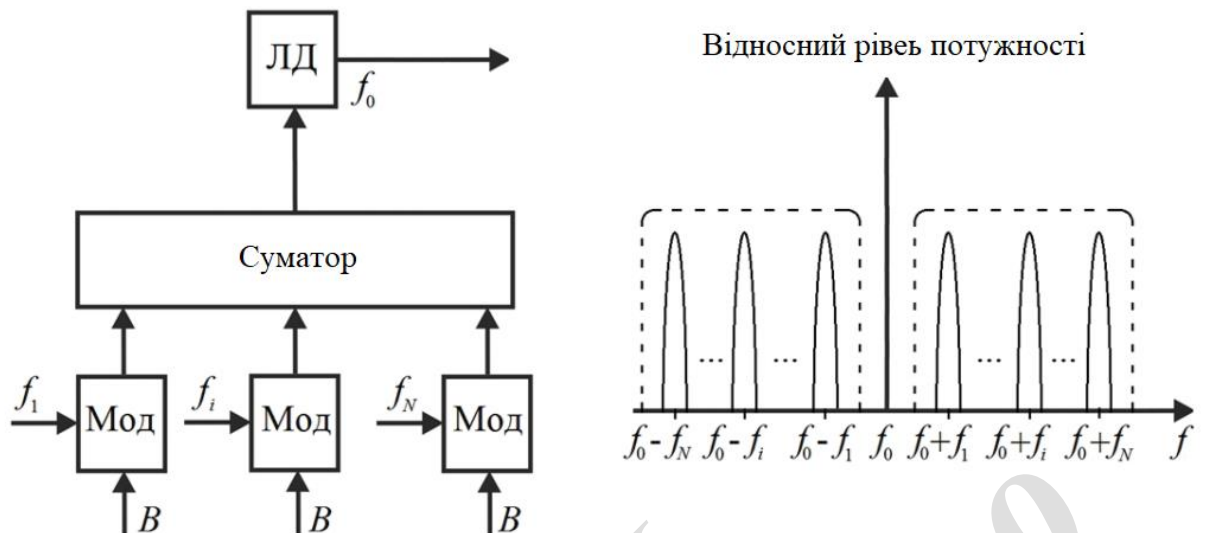


Рисунок 1.1 - Пряма модуляція випромінювання ЛД багатоканальним сигналом

На рис. 1.2 схематично показаний процес зовнішньої модуляції багатоканальним сигналом, що складається з частотно-розділених каналів сформованих в РЧ діапазоні. При зовнішньої модуляції для зміни параметрів оптичної несучої використовують модулятори, виконані з матеріалів, показник заломлення яких змінюється від впливу або електричного, або магнітного, або акустичного полів. змінюючи вихідними сигналами параметри цих полів можна модулювати параметри оптичної носійної. Якість роботи модуляторів визначається такими параметрами, як керуюча напруга і потужність, лінійність модуляційної характеристики і глибина модуляції, втрати світла і ін. Зовнішні модулятори розширюють можливості створення оптичного передавача з оптимальними параметрами, оскільки вибір його основних елементів може проводитися незалежно і найбільш повно задовольняти комплексу вимог. Найважливішим фактором широкого застосування зовнішньої модуляції в ВОСП є можливість створення умов, при яких в оптичному діапазоні сигналу буде присутній тільки одна з бічних смуг (SSB - single-sideband), таким чином, вирішується завдання ефективного витрачання оптичної потужності в перерахунку на канал [11]. На рис. 1.2 показаний випадок використання односмугового оптичного модулятора (ОМ) інтенсивності світла.

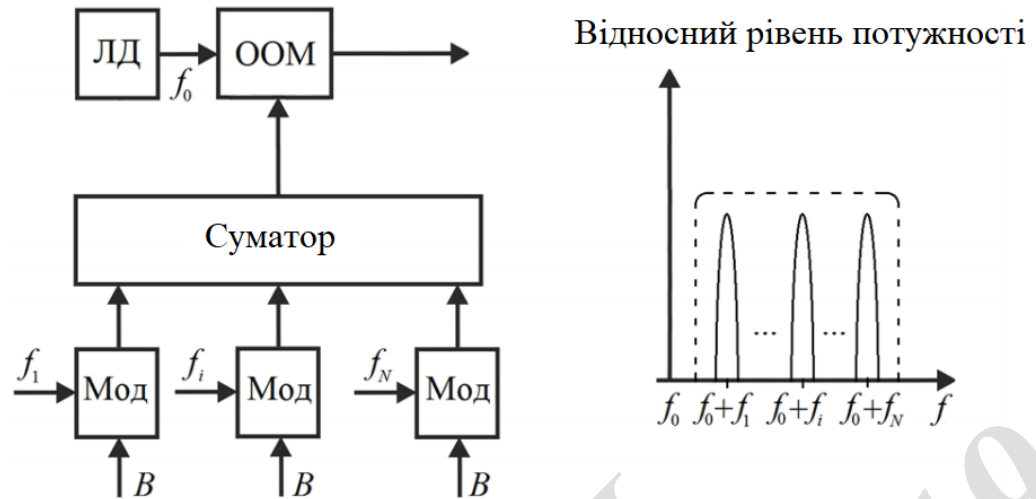


Рисунок 1.2 - Зовнішня модуляція багатоканальним сигналом

У ВОСП на приймальній стороні можуть використовуватися два методи фотодетектування. Розрізняють пряме детектування і когерентне детектування оптичного сигналу. На рис. 1.3 а) схематично показаний процес прямого детектування оптичного сигналу, що містить безліч каналів в РЧ діапазоні. Оптичний сигнал потрапляє на зіницю фотодіода (ФД) та після оптоелектронного перетворення в ідеальному випадку фотострум містить електричні копії каналних сигналів. Виділити кожен каналний сигнал можна за допомогою відповідних демодуляторів (Демод) і НЧ фільтрів.

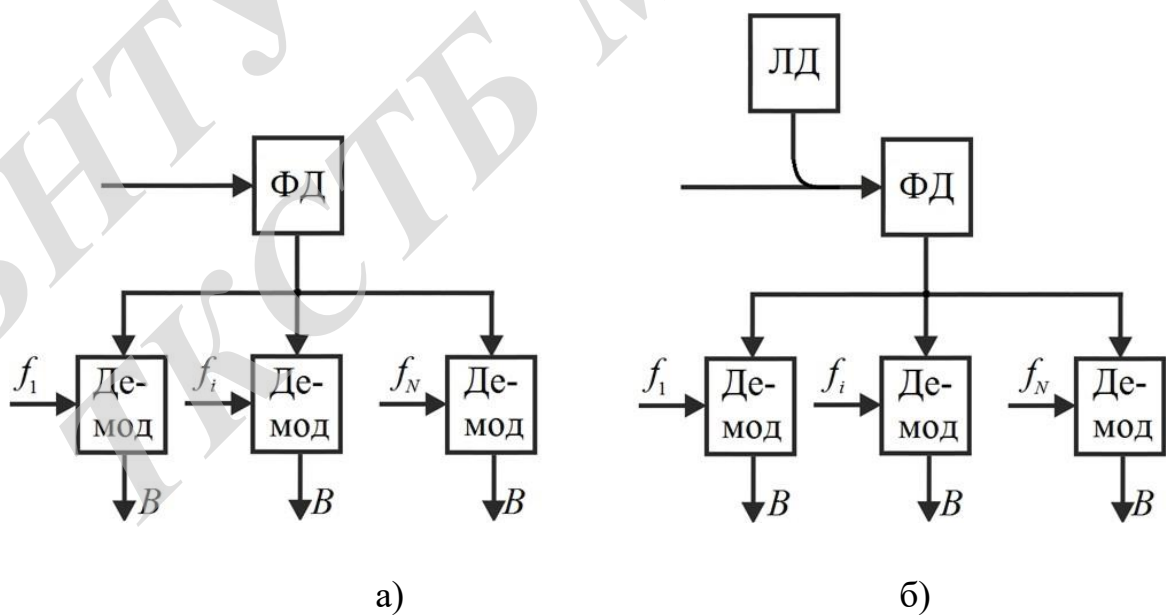


Рисунок 1.3 - Види фотодетектування: пряме а); гомодинного б)

На рис. 1.3 б) схематично показана різновид когерентного детектування оптичного сигналу, що містить безліч каналів в РЧ діапазоні - гомодинного прийом. Оптичний багатоканальний сигнал підсумовується з випромінюванням місцевого гетеродина, в якості якого може виступити високостабільний ЛД і потрапляє на зіницю ФД. У класичному гетеродина приймачі вихідний фотострум ФД містить копію групового багатоканального сигналу на проміжній частоті, далі звичайним радіотехнічним способом відбувається демодуляція в каналні сигнали низьких частот [11]. Однак при використанні цього методу виникають труднощі апаратної реалізації, тому що доводиться вибирати значення проміжної частоти, що перевищує частотну смугу багатоканального сигналу, тому даний метод не отримав практичного застосування. При збігу оптичної частоти високостабільного ЛД з частотою оптичного багатоканального сигналу (гомодинного прийом) відбувається оптичне змішування і далі оптоелектронні перетворення після якого за допомогою демодуляційних схем виділяються каналні сигнали (Рис. 1.3 б). В цілому, для організації когерентного прийому пред'являються високі вимоги на спектральні характеристики оптичних джерел випромінювання, як на приймальній стороні, так і на передавальній стороні. Внаслідок високої ціни на такі компоненти і складних схемних рішень когерентні методи фотодетектування в найближчому майбутньому економічно неефективно впроваджувати в обладнання призначеного для користувача класу. Цей метод може застосовуватися в приймальному обладнанні на вузлах комутації каналів.

Таким чином, для мереж доступу, в яких кількість користувачів, швидкість передачі і набір послуг мультисервісних послуг інтенсивно росте, застосування технології когерентного прийому в приймальні частини для користувача пристроїв на сьогоднішній день економічно не вигідно, так як використання більш складного обладнання призводить до подорожчання всієї мережі. Застосування прямого фотодетектування на приймальній стороні спільно з використанням широкопasmового апаратури в діапазоні радіочастот РЧ, можливість формування піднесуть каналів за допомогою багаторівневих форматів модуляції дозволяє без надмірних витрат збільшити швидкість передачі сигналів в оптичних мережах доступу.

У даній роботі для формування піднесуть каналів розглядаються наступні цифрові методи модуляції: фазова маніпуляція або бінарна фазова модуляція (BPSK - binary phase-shift keying), амплітудно-імпульсна модуляція (ASK - amplitude-shift keying), квадратурного-фазова модуляція (QPSK - quadrature phase-shift keying), квадратурного-амплітудна модуляція

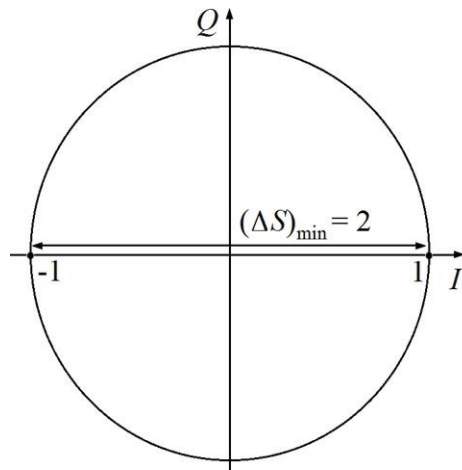
(QAM quadrature amplitude modulation) різного рівня [7]. На рис. 1.4 представлені IQ-діаграми (сигнальні сузір'я), відповідні форматам модуляції BPSK, ASK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM піднесуть частот.

Як видно з рис. 1.4 в результаті модуляції піднесе форматом BPSK амплітуда сигналу постійна, а фаза в залежності від переданих інформаційних бітів (логічної «1» або «0») може змінюватися стрибком на $\pm \pi$. При форматі модуляції ASK, при логічному «0» сигнал піднесе НЕ передається, що відповідає «включенню-вимикання» частоти, що піднесе. При форматі модуляції QPSK амплітуда сигналу постійна як в форматі BPSK. Модуляцію QPSK можна уявити як здвоєний метод BPSK, в одному з них фаза приймає значення $+\pi/4$ або $-\pi/4$, а в іншому $+\pi/4$ або $-\pi/4$. При такому способі модуляції кожної сигнальної посилю модульованого сигналу відповідають два біта. Формати модуляції BPSK, ASK, QPSK можна віднести до форматів тільки з фазовою модуляцією. У порівнянні з ними формат модуляції L-QAM поєднує в собі амплітудну і фазову модуляції, тому його можна розглядати як багаторівневу фазову модуляцію, де L - рівень модуляції і визначає кількість станів амплітуди піднесе. Як видно з рис.1.4 при 16-QAM маємо 16 станів в IQ-діаграмі, при 64-QAM - 64 станів, а при 256-QAM - 256 станів. Таким чином, кількість біт відповідних одному стану в IQ-діаграмі визначається $\log_2 M$, отже, за один тактовий інтервал можна передавати 4 біта для 16-QAM, 6 біт для 64-QAM, 8 біт для 256-QAM.

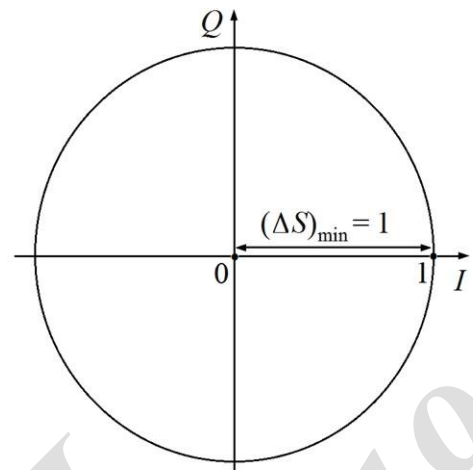
Різні формати модуляції дозволяють організувати в піднесуть каналах передачу сигналів з різними швидкостями при різних відносинах сигнал / шум. У даній роботі критерієм оцінки завадостійкості розглянутих форматів модуляції прийнято найменша відстань між сусідніми точками сигналу в IQ-діаграмі, яке характеризує ставлення сигнал / шум. Якщо пікову амплітуду прийняти за одиницю, то нормоване мінімальна відстань між сусідніми точками $(\Delta S)_{\min}$ можна розрахувати за допомогою елементарних геометричних розрахунків. У Таблиці 1.1 наведено нормовані значення $(\Delta S)_{\min}$ в залежності від формату модуляції в піднесуть каналах. для формату модуляції L-QAM існує формула для визначення $(\Delta S)_{\min}$:

$$(\Delta S)_{\sin} = \sqrt{2} / (\sqrt{L} - 1). \quad (1.1)$$

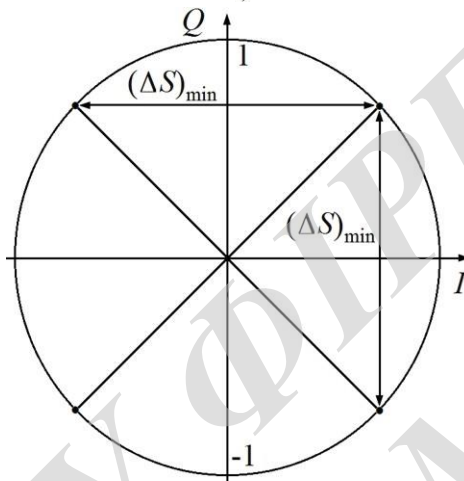
Наведені в табл. 1.1 значення мінімальної відстані між сусідніми точками використовуються для оцінки показника якості сигналів на приймальній стороні після фотодетектування.



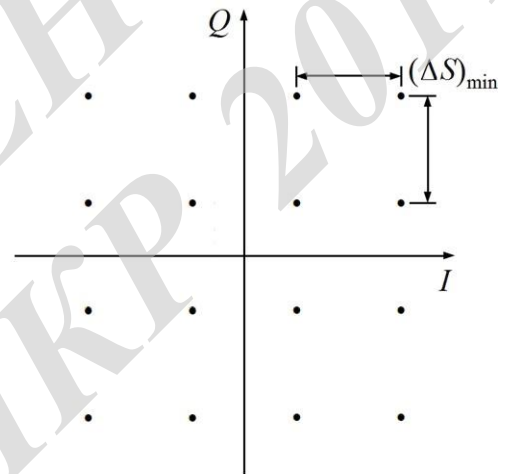
а)



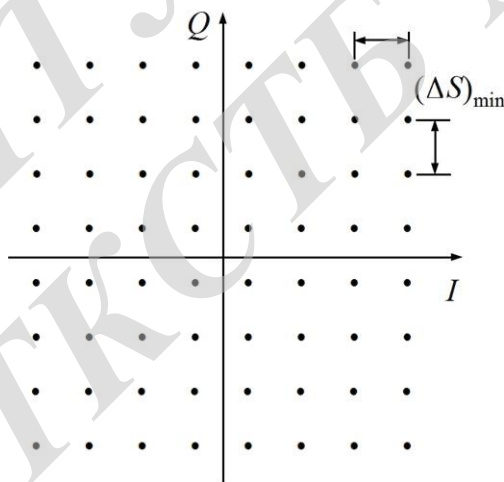
б)



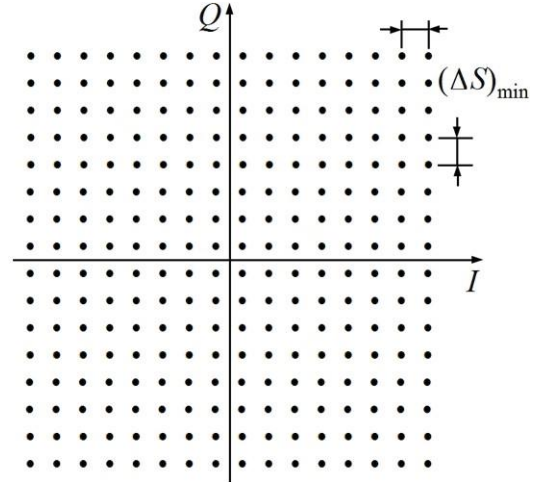
в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.4 - IQ-діаграми для форматів модуляції:
 а) - BPSK; б) - ASK; в) - QPSK; г) - 16-QAM; д) - 64-QAM; е) - 256-QAM

Таблиця 1.1 - Нормовані значення $(\Delta S)_{\min}$

Формат модуляції	Нормоване значення
BPSK	2
ASK	1
QPSK	$\sqrt{2}$
16-QAM	$\sqrt{2}/3$
64-QAM	$\sqrt{2}/7$
256-QAM	$\sqrt{2}/15$

1.2 Місце частотного поділу каналів в ВОСП

В даний час в ВОСП використовують, в основному, три види мультиплексування - часове (TDM - time division multiplexing), частотне в РЧ діапазоні (SCM) і частотне в оптичному діапазоні (WDM). Для порівняльної оцінки характеристик цих методів мультиплексування, розглянемо особливості цих систем передачі в припущенні, що вихідні канали, призначені для передачі, мають однакові швидкості передачі B (див. рис. 1.5).

В оптичних системах передачі із застосуванням TDM, канали мультиплексується в часовому мультиплексорі (TDM MUX) (рис. 1.5 а). Якщо припустити, що потрібно передати N каналний сигнал, то після мультиплексування багатоканальний сигнал з пропускною здатністю NB подається на оптичний модулятор (ОМ) з смугою NB , далі, модульований оптичний сигнал вводиться в волокно, поширюється по ньому, детектується в фотодетекторі з смугою приблизно рівною $2NB$ і відбувається часове розділення каналів в демультимплексорі (TDM DMUX). Для розглянутого випадку, необхідна смуга пропускання оптичного волокна для N каналів складе $2NB$, тому, для передачі одного каналного сигналу потрібна смуга $2B$.

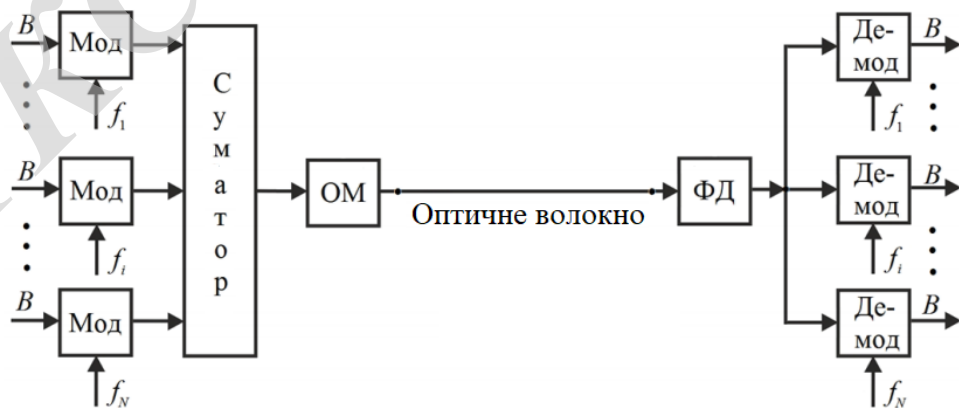
В оптичних системах передачі з частотним поділом в РЧ діапазоні (рис. 1.5 б), сформовані за допомогою модуляторів N підносійні канали зі смугою $2B$ підсумовуються, в результаті отриманий багатоканальний сигнал з смугою $2NB$ подається на ОМ. Якщо в якості ОМ використовується лазерний діод, то необхідна смуга оптичного модулятора становить $4NB$ [20, 18]. Якщо модуляція реалізується за допомогою зовнішнього модулятора, то смуга модулятора становить NB . Переданий оптичний сигнал детектується в приймальному з смугою $6NB$ або $2NB$ в залежності від використовуваного

модулятора. Кожен канал виділяється за допомогою демодуляторів або смугових фільтрів зі смугами, приблизно рівними $2B$. Таким чином, техніка мультиплексування піднесуть каналів дозволяє використовувати смугу оптичного волокна $6NB$ при прямій модуляції і $2NB$ при зовнішньої модуляції, тому, для передачі одного каналного сигналу потрібна смуга $6B$ або $2B$.

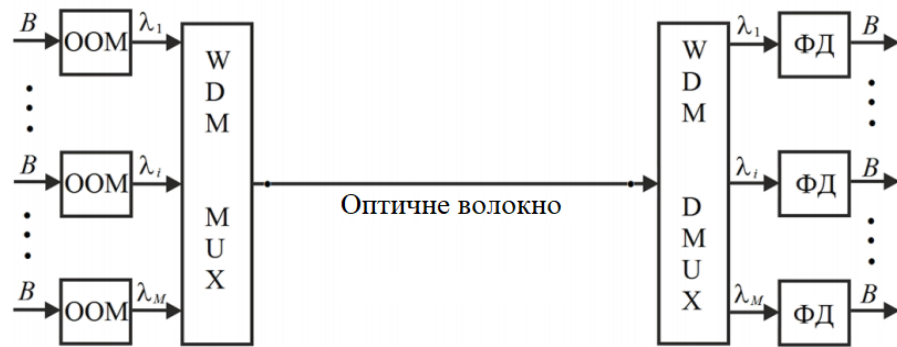
В оптичних системах передачі з мультиплексуванням по довжинах хвиль (рис. 1.5 в), M оптичних носійних модулюються каналними сигналами зі швидкістю передачі B , отже, якщо використовувати односмугову модуляцію, то необхідна смуга кожного ООМ складе B . Далі, M оптичних каналних сигналів мультиплексується в оптичному мультиплексорі (WDM MUX) і передаються через оптичне волокно. На приймальній стороні оптичні каналні сигнали розділяються за допомогою оптичного демультіплексора (WDM DMUX) і потрапляють на фотодетектори з частотною смугою $2B$, на виходах яких виділяються передані канали зі швидкістю передачі B . Якщо припустити що, частотний рознос між каналами становить $10B$, то необхідна смуга пропускання оптичного волокна складе приблизно $10MB$. Отже, необхідна смуга для кожного каналу складе приблизно $10B$.



а)



б)



в)

Рисунок 1.5 - Структурні схеми ВОСП з прямим фотодетектуванням з різними методами мультиплексування каналів: а) часове (TDM); б) частотне в РЧ діапазоні за допомогою підносійних (SCM); в) частотне в оптичному діапазоні (WDM)

Порівнюючи ці три види мультиплексування, видно переваги і недоліки кожного з них. Системи передачі з TDM і SCM мультиплексуванням мають велику перевагу в тому, що для передачі багатоканального сигналу необхідний тільки одне джерело оптичного випромінювання, в той час як для WDM мультиплексування кількість оптичних джерел випромінювання дорівнює кількості каналів. При прямій модуляції лазерного діода, системи з SCM потребують найбільшої смуги пропускання для оптичного модулятора (приблизно в 4 рази більше, ніж в системі з TDM). Відносно смуги пропускання оптичного волокна, системи з TDM потребують меншою смузі на один канал ($2B/\text{канал}$), ніж системи з SCM і WDM (в середньому в 3-5 разів). Отже, якщо в якості оптичних модуляторів в системах з TDM і SCM використовувати однакові лазерні діоди, то пропускна здатність системи з SCM складе четверту частину системи з TDM. Ситуація зміниться при переході на зовнішню модуляцію, при якій вимоги до смуги пропускання оптичних модуляторів в системах з TDM і SCM стануть однаковими. Головним недоліком системи з TDM є те, що зі збільшенням швидкості передачі по оптичному тракту з'являється необхідність в швидкодіючих, досить складних і дорогих тимчасових мультиплексорів і демультіплексорів в кінцевих пристроях. Цей факт може стати критичним з точки зору застосування в мережах доступу, якщо обладнання розташоване у користувача і більш того, якщо є необхідність поділу ресурсів мережі між багатьма користувачами. Так, наприклад, в реальних топологіях мереж доступу, де користувачі нерівномірно розміщені територіально щодо центральної станції, виникають тимчасові затримки при

поширенні сигналів. Ці тимчасові затримки можуть погіршити показники якості сигналу при алгоритмічних процедурах динамічного розподілу смуги (DBA - dynamic bandwidth allocation) заснованої на технології TDM [12]. Таким чином, незважаючи на те, що передача цифрових сигналів, що використовує технологію TDM, в даний час широко поширена, при переході на високошвидкісну передачу даних, виникають труднощі в реалізації економічно ефективних для користувача пристроїв. Це пов'язано з тим, що доводиться приймати весь потік цифрової даних і тільки потім виділяти дані, адресовані конкретному користувачеві. У зв'язку з цим виникають питання щодо забезпечення інформаційної безпеки переданої інформації, що є критичною умовою для реалізації стратегії розвитку інформаційного суспільства України на 2017 - 2030 роки.

Оскільки чутливість приймача падає зі збільшенням смуги частот, системи з TDM мають порівняно малу пропускну здатність в оптичних розподілених мережах доступу. Незважаючи на все вищесказане, системи з часовим поділом каналів не повинні розглядатися як антипод системам з частотними методами поділу каналів. При організації зв'язку між двома кінцевими пунктами, наприклад, при передачі по магістральних лініях зв'язку, для отримання великої пропускну здатності, прийнятно поєднувати технології TDM і WDM.

Технології частотного поділу каналів, як в оптичному, так і в РЧ діапазоні, можуть застосовуватися для створення пасивних оптичних систем передачі порівняно невеликої довжини, але відповідають вимогам підвищеної ємності і адаптивності до нестаціонарним і багатоцільовим режимам експлуатації. На відміну від TDM, системи з SCM можуть передавати як звичайні цифрові потоки, так і широкосмугові сигнали в радіодіапазоні без будь-яких перетворень, наприклад, сигнали, використовувані в бездротових мережах або багатоканальні телевізійні (ТВ) сигнали, що використовуються в кабельних мережах ТВ-мовлення. При частотному поділі каналів інформаційні дані, що переносяться різними підносійними каналами, незалежні один від одного і не потребують синхронізації, реалізація мультиплексування і демуплексування піднесуть каналів досить проста, а апаратура в РЧ діапазоні добре розроблена. Використовуючи сучасні цифрові формати модуляції в піднесуть каналах можна формувати багатоканальний сигнал і передавати його по розподіленій мережі, а на приймаючу сторону можна виділяти, посилювати і демоделювати певні підносійні за допомогою існуючого РЧ обладнання.

Немає необхідності в надширокосмугових підсилювачах і високошвидкісних демультіплексорів.

На сьогоднішній день широкого поширення набули двоволоконні оптичні системи передачі, де одне волокно призначене для передачі, а інше для прийому. Такі системи використовуються як в магістральних мережах, так і в мережах доступу. Відзначимо, що наведені на рис. 1.5 схеми сімплексні, тобто передача всіх каналів відбувається по одному волокну в одному напрямку. Однак з розвитком PON технологій в мережах доступу, де відстані не перевищують десятка кілометрів і в тракті відсутні оптичні підсилювачі або регенератори, ефективно використовувати дуплексний зв'язок по одному оптичному волокну з використанням технології частотного поділу каналів. Проте, при необхідності на ділянках мережі можуть використовуватися розподілені волоконно-оптичні підсилювачі Рамана, що може бути затребуване в мережах доступу великого радіусу дії (LR - long-reach) [46]. Залежно від області частот, дуплексний зв'язок можна організувати як в оптичному, так і в РЧ діапазоні. Розділивши оптичний спектр довжин хвиль на два діапазони, можна в протилежних напрямках передавати каналні сигнали двох різних діапазонів. Узагальнена структурна схема одно волоконної оптичної системи передачі з застосуванням технології DWDM надана на рис. 1.6 [29].

Кількість дуплексних каналів в системі, розміщених в оптичному спектрі $M = 2m$. На віддалених кінцях ділянки мережі розташовані оптичні MUX і DMUX, а також оптичні циркулятори, щоб забезпечити об'єднання / поділ спектральних каналів. Як бачимо, канали з довжинами хвиль, у яких індекси приймають непарні числові значення, відповідають передачі з лівого боку на праву, а з парними індексами - в зворотному напрямку. На рис. 1.6 показано розподіл довжин хвиль каналів в оптичному діапазоні. Як бачимо, для поділу спектральних каналів за напрямками використовуються різні оптичні діапазони, і канали рівномірно розміщені в цих діапазонах. Для спрощення реалізації поділу каналів на кінцях ділянки мережі присутні оптичні циркулятори або оптичні фільтри. Однак неідеальні амплітудно-частотні характеристики цих пристроїв, вимагають передбачити захисну смугу $\Delta\lambda_g$ діапазонів спектрів для двох напрямків. Очевидно - чим більше захисна смуга, тим технічно легше розділити спектральні діапазони, але збільшення $\Delta\lambda_g$ призведе до неефективного використання оптичного спектру.

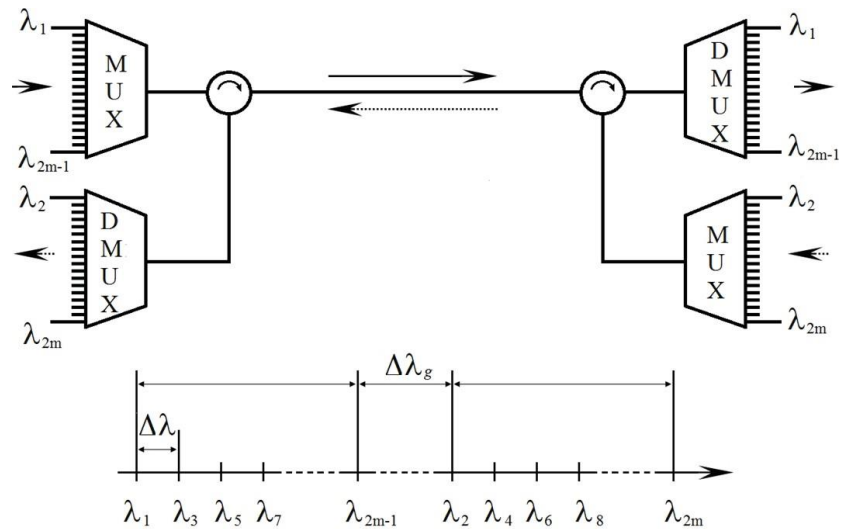


Рисунок 1.6 - Дуплексна система передачі із застосуванням DWDM

Подібну схему дуплексної передачі можна організувати на одній довжині хвилі за допомогою частотного поділу піднесуть каналів (рис. 1.7). Тут також використовуються циркулятори, що працюють, проте, в РЧ діапазоні [15, 24, 25, 41]. Через неідеальних характеристик циркулятора тут також необхідно передбачити захисну смугу Δf_g між РЧ піддіапазонами, в яких підносійні канали з парними індексами передбачені для передачі в одному напрямку, а з непарними індексами - в зворотному напрямку.

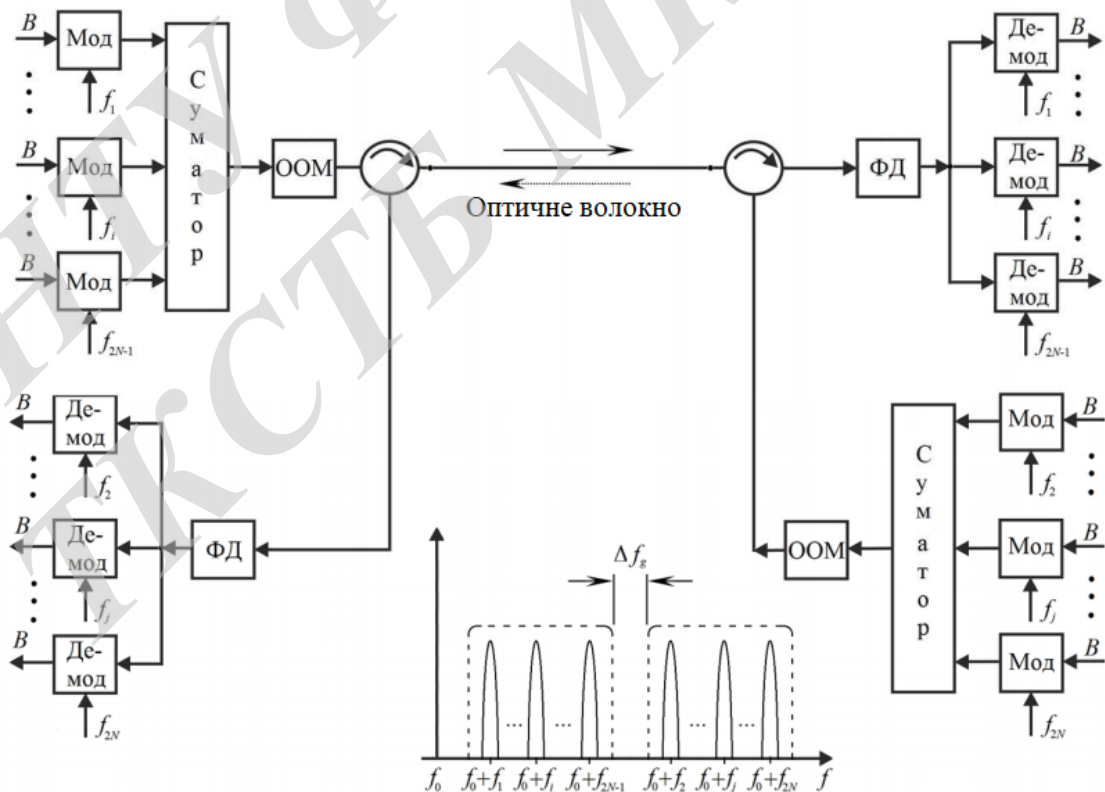


Рисунок 1.7 - Дуплексна система передачі із застосуванням частотного поділу підносійних каналів

Таким чином, для збільшення пропускної здатності одноволоконних ділянок пасивних мереж з частотним поділом каналів необхідно збільшувати кількість спектральних і піднесуть каналів, оптимально вибрати частотний інтервал між оптичними і підносійними каналами в заданих діапазонах частот, а також мінімізувати ширину захисної смуги.

Порівнюючи технології TDM і технології частотного поділу каналів SCM і DWDM, наведемо наступні переваги останніх:

- більш ефективне використання широкосмуговості одномодового волокна і радіодіапазоні частот;
- гнучкість при створенні мережі доступу і довільному розподілі трафіку різноформатних переданих сигналів;
- можливість використання вже розробленої, надійної і відносно недорогий мікроелектроніки РЧ діапазону;
- сумісність в майбутньому з мережами доступу, що володіють ультра великою пропускною здатністю, що використовують когерентні технології.

Безсумнівно, що використання даних видів мультиплексування або їх комбінацій залежить не тільки від сфери їх застосування та технічних характеристик, а й від економічної доцільності, сумісності з існуючими і майбутніми системами.

1.3 Висновки по першого розділу

В результаті порівняльного аналізу технологій TDM, SCM, DWDM виявлені переваги спільного використання SCM і DWDM в пасивних волоконно-оптичних мережах доступу передтехнологією TDM. Використання багаторівневих цифрових форматів модуляції при формуванні каналів, а також частотне розділення каналів дозволяють збільшити швидкість передачі сигналів в мережах доступу. Так як в даній роботі багатоканальні сигнали формуються як в оптичному діапазоні, так і в електричному, їх сумарна кількість визначатиме завантаження. Під завантаженням системи передачі розуміється сукупність одночасно діючих каналів різного типу. Завантаження характеризується в основному кількістю каналів і потужністю багатоканального сигналу. Волоконно-оптичні мережі доступу мають певну сумарну пропускну здатність, безпосередньо пов'язану із завантаженням і найважливішим питанням є розподіл завантаження між користувачами послуг зв'язку. Перевищення допустимих значень, наприклад енергетичних параметрів багатоканального сигналу, як в оптичному діапазоні, так і в електричному призводить до стану перевантаження

волоконно-оптичного тракту. Перевантаження спостерігається в разі переходу оптоелектронних модулів в нелінійний режим функціонування, а в оптичному діапазоні виникає в волокні при перевищенні порогового рівня оптичної потужності конкретного типу волокна. У зв'язку з цим на різних ділянках волоконно-оптичного тракту виникають небажані перехресні перешкоди у вигляді інترمодуляційних спотворень і різного роду шумів, що діють на корисні сигнали одночасно. Тому необхідно мати математичний апарат для розрахунку параметрів волоконно-оптичного тракту виходячи з необхідних показників якості сигналів в каналах.

У МКР розробляється і досліджується комплекс методів і моделей для детального вивчення впливу перевантажень на різних ділянках оптичного тракту, що дозволяє оцінити максимально-можливу пропускну здатність мереж доступу з частотним поділом каналів з різними форматами модуляції.

ВНТУ ФІРЕНЦІ
ТКСТЬ МКР 2019

2 ПРЯМЕ ФОТОДЕТЕКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ ЧАСТОТНИМ РОЗПОДІЛОМ КАНАЛІВ

2.1 Вибір параметрів фотоприймального пристрою для оптимального детектування підносійних сигналів

Як уже зазначалося в розділі 1, в даній роботі досліджуються системи з прямим фотодетектуванням, які в даний час мають достатнє поширення через свою простоту і економічної доцільності. У ВОСП з прямим детектуванням підносійних, на приймальній стороні, в основному, використовують р-і-п і лавинні (ЛФД) фотодіоди. Після фотодетектування груповий електричний сигнал, який містить всі підносійні канали, посилюється в малошумні підсилювачі (МШП) радіочастотного діапазону. Далі, підносійних демодулюються згідно з переданим форматом (BPSK, ASK, QPSK, QAM).

В даний час існують широкосмугові, з пропускну здатністю більше 40 ГГц фотодетектори, що застосовуються в ВОСП з частотним поділом каналів в радіодіапазоні. Як правило, випускаються фотоприймальні пристрої містять високочастотний МШП, підключений до фотодетектора. Таким чином, забезпечується посилення в широкому діапазоні частот з низьким коефіцієнтом шуму [12].

Одним з основних параметрів в ВОСП з підносійними каналами є енергетичний бюджет системи. Ключовим параметром, що забезпечує необхідний енергетичний бюджет, є чутливість фотоприймального пристрою.

Грунтуючись на забезпеченні максимально можливої пропускну здатності системи і чутливості фотоприймального пристрою, визначимо і порівняємо оптимальні значення характеристик системи при використанні на прийомі р-і-п і лавинного фотодіода. Для цього необхідно знайти оптимальні параметри фотоприймача для досягнення необхідного SNR.

На приймальній стороні SNR визначається [13]:

$$SNR = \frac{1/2m^2 I_{cp}^2 M_{ЛФД}^2}{\left(\langle I_{екв}^2 \rangle + 2q(I_{cp} + I_{m,y})M_{ЛФД}^2 F(M_{ЛФД}) + M_{ЛФД}^2 I_{cp}^2 (ВІШ + ІМС) \right) \Delta f_{ef}}, \quad (2.1)$$

де I_{cp} - середній прийнятий фотострум, m - глибина оптичної модуляції на один канал, ВІШ - відносна інтенсивність шуму оптичного модулятора, ІМС - шум, викликаний інтермодуляційними спотвореннями в системі, q -

заряд електрона, $\Delta f_{\text{ефф}}$ - ефективна частотна смуга одного каналу. Характерний для схеми приймача шум описується еквівалентної вхідний спектральної щільністю шумового струму $\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle$ наведеної до входу приймача, а сам фотодетектор, в разі ЛФД, описується коефіцієнтом множення $M_{\text{ЛФД}}$. Зауважимо, що внесок темнового струму $I_{\text{т. у}}$ в загальний шум незначний і разом з тепловим шумом $\langle I_{\text{тепл}}^2 \rangle$ приймача включений в еквівалентний вхідний шумовий струм $\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle$. Коефіцієнт шуму $F(M_{\text{ЛФД}})$ визначається як $F(M_{\text{ЛФД}}) = M_{\text{ЛФД}}^x$, де x - величина постійна. Так, наприклад, характерні значення x для InGaAs і Ge ЛФД становлять 0,7 і 0,95, відповідно. Для p-i-n фотодетектора $M_{\text{ЛФД}} = 1$ і $F(M_{\text{ЛФД}}) = 1$.

Визначимо оптимальне значення коефіцієнта лавинного множення $M_{\text{ЛФД,опт}}$, при якому фотострум може приймати мінімальне значення $I_{\text{ср.мін}}$ для досягнення необхідного SNR . Для цього, наведемо вираз (3.1) до функціонального виду $F(M_{\text{ЛФД}}, I_{\text{ср}}) = 0$ і, використавши метод диференціювання неявної функції, знайдемо оптимальне значення коефіцієнта множення $M_{\text{ЛФД,опт}}$ і, підставляючи останнім у вихідний вираз (3.1), після деяких перетворень отримаємо $I_{\text{ср.мін}}$:

$$M_{\text{ЛФД,опт}} = \left[\frac{\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle (m^2 - 2SNR\Delta f_{\text{ефф}}(BIII + IMC))}{SNR\Delta f_{\text{ефф}}(qx)^2(1 + 2/x)} \right]^{1/2(1+x)}. \quad (2.2)$$

$$I_{\text{ср.мін}} = \left[\frac{2SNR\Delta f_{\text{ефф}} \left(\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle \right)^{x/(2+x)} (qx)^{2/(2+x)} (1 + 2/x)}{m^2 - 2SNR\Delta f_{\text{ефф}}(BIII + IMC)} \right]^{(2+x)/2(1+x)}. \quad (2.3)$$

Зауважимо, що під час виведення (3.2) і (3.3) за умови оптимального фотодетектування знаходимо співвідношення між параметрами $I_{\text{ср.мін}}$, $M_{\text{ЛФД,опт}}$ і $\langle I_{\text{екв}} \rangle$:

$$I_{\text{ср.мін}} = \frac{\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle}{qxM_{\text{ЛФД,опт}}^{(2+x)}}. \quad (2.4)$$

Порівнюючи мінімальний необхідний фотострум для ЛФД і фотострум для p-i-n фотодетектора для певного необхідного SNR , знайдемо відносний приріст чутливості приймача, при використанні лавинного фотодетектора.

Обговоримо доцільність використання р-і-п фотодіода і ЛФД при прийомі сигналів цифрових форматів модуляції в піднесуті каналах. Для порівняльного аналізу розглянемо приклад фотодетектування каналних сигналів зі смугою 64 МГц до необхідного $SNR = 20$ дБ, в припущенні, що глибина модуляції в каналі становить $m = 0,08$, рівні ВШ = -138 дБ/Гц, ІМС=155 дБ. На рис. 2.1 показана залежність мінімального необхідного фотоструму від спектральної щільності еквівалентного вхідного шумового струму при використанні різних фотодіодів - р-і-п і ЛФД, при цьому показані криві для 2 типових ЛФД: Ge і InGaAs ЛФД. Як видно з рис. 2.1 в широкому діапазоні шумів приймача, необхідний мінімальний фотострум менше за величиною при використанні на прийомі ЛФД в порівнянні з р-і-п ФД. Зауважимо, що розрахунки проводилися при оптимальних значеннях коефіцієнта множення $M_{\text{ЛФД,опт}}$. На рис. 3.2 показана залежність $M_{\text{ЛФД,опт}}$ від спектральної щільності еквівалентного вхідного шумового струму при тих же вихідних параметрах. Як видно з рис. 3.2 «оптимальність» фотодетектування залежить від рівня шуму фотоприймального пристрою і в діапазоні шуму $\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle$ від $10 \text{ пА}^2/\text{Гц}$ до $100 \text{ пА}^2/\text{Гц}$, де $M_{\text{ЛФД,опт}}$ приймає значення від 3 до 8.

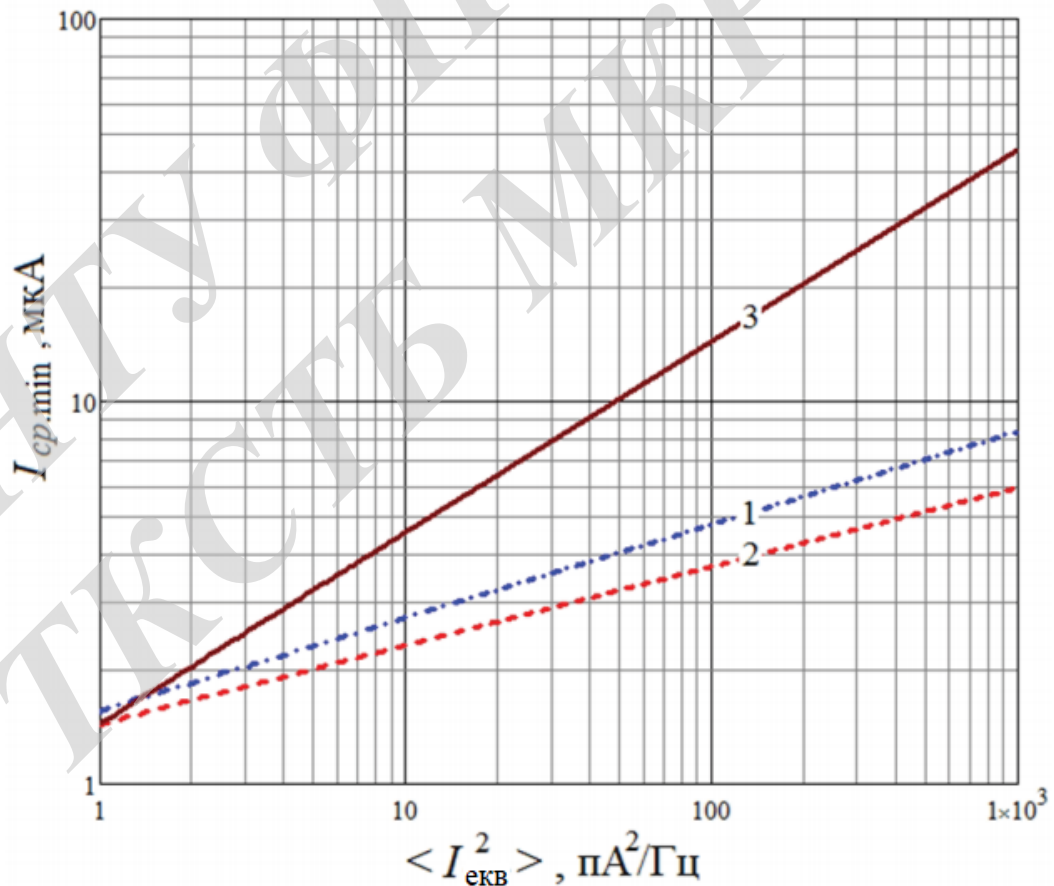


Рисунок 2.1 - Залежність чутливості фотоприймального пристрою від спектральної щільності еквівалентного вхідного шумового струму при використанні різних фотодіодів: 1 - Ge ЛФД; 2 - InGaAs ЛФД; 3 - р-і-п ФД

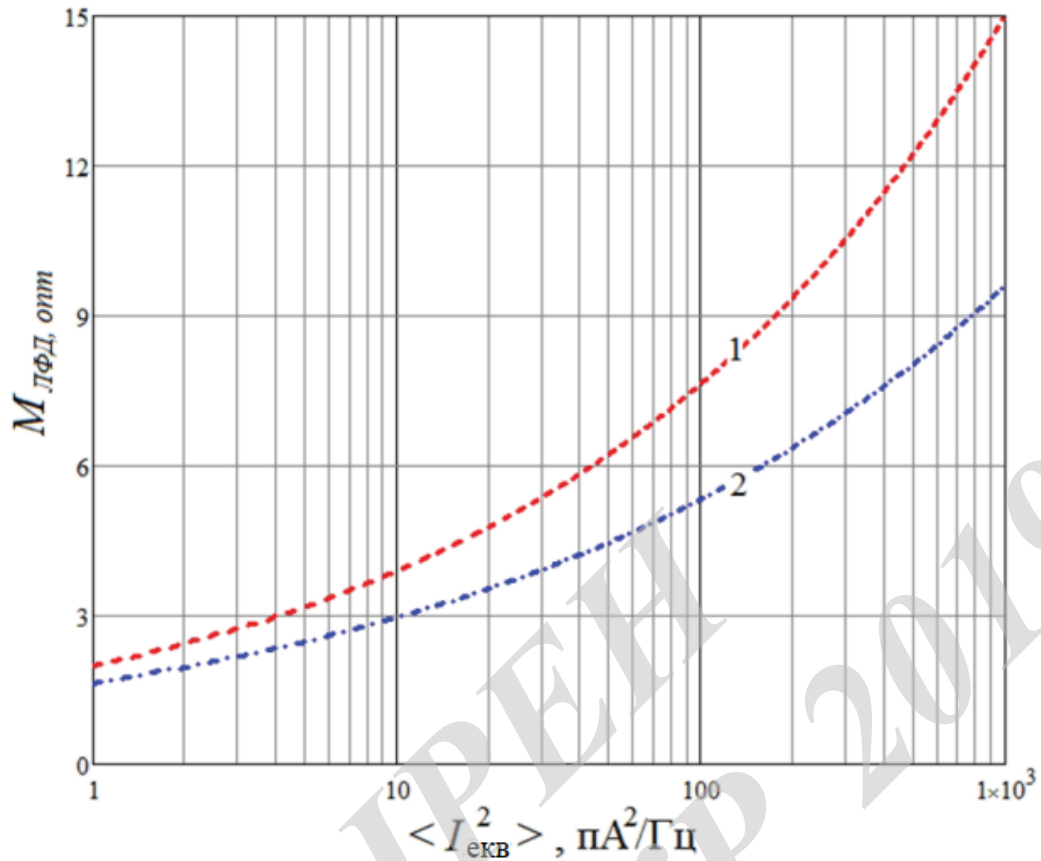


Рисунок 2.2 - Залежність оптимального коефіцієнта множення ЛФД від спектральної щільності еквівалентного вхідного шумового струму:

1 - InGaAs ЛФД; 2 - Ge ЛФД

Таким чином, ЛФД має перевагу перед р-і-п ФД в чутливості фотоприймального пристрою. Оцінимо відносний приріст чутливості приймача з ЛФД в порівнянні з р-і-п фотодетектором для вище розглянутого прикладу при $SNR = 20$ дБ. На рис. 2.3 показаний відносний приріст чутливості приймача (в дБ) при використанні InGaAs і Ge матеріалів в ЛФД в порівнянні з типовим р-і-п ФД. Отже, для досягнення максимальної чутливості приймача в ВОСП з цифровими форматами модуляції в підносійних каналах, які потребують SNR близько 20 дБ необхідно використовувати ЛФД. Однак це справедливо, якщо досить точно відомі шумові характеристики підсилювача, наприклад $\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle$. Знаючи $\langle I_{\text{екв}}^2 \rangle$, можна вибрати оптимальний режим множення в ЛФД, тобто $M_{\text{ЛФД, опт}}$, при якому для необхідного SNR чутливість максимальна (фотострум мінімальний).

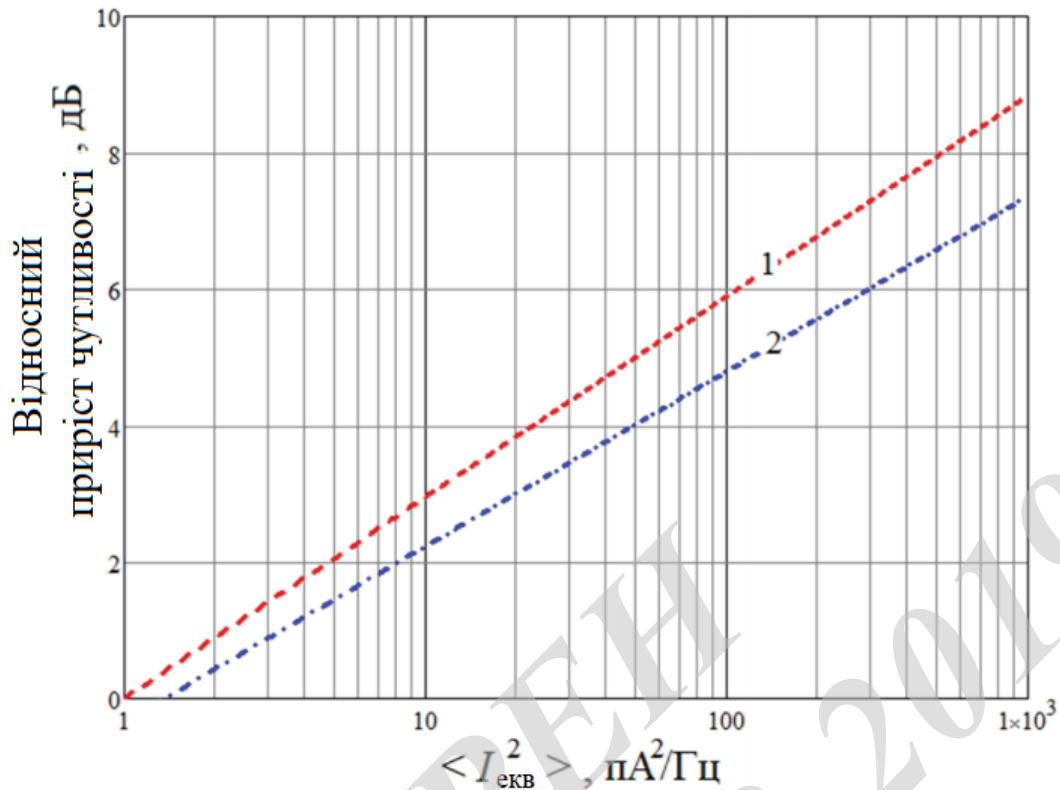


Рисунок 2.3 - Відносний приріст чутливості при використанні ЛФД замість р-і-п ФД в залежності від спектральної щільності еквівалентного вхідного шумового струму: 1 - InGaAs ЛФД; 2 - Ge ЛФД

Іншим важливим параметром ВОСП з частотним поділом піднесуть каналів є оптимальний вибір глибини оптичної модуляції в перерахунку на один канал - m [40]. Як видно з виразу (3.1), збільшення m призводить до збільшення потужності сигналу, але зі збільшенням останньої, починається збільшення рівня шумів і генерація нелінійних спотворень, пов'язаних з нелінійністю оптичного модулятора, середовища передачі і оптичного приймача. Оцінку впливу на сигнал нелінійних спотворень в оптоелектронних пристроях, а також квантового шуму на SNR розглянемо на прикладі 32-канальної системи з каналною смугою 64 МГц при рівні ВШШ = -138 дБ / Гц.

На рис. 2.4 графічно показані залежності SNR від глибини модуляції в одному каналі 32-канальної системи передачі. Відзначимо, що криві на рис. 2.4 вийшли при припущенні, що в системі присутній тільки певний шумовий фактор. Очевидно, що в реальній ситуації всі ці шумові фактори впливають на сигнал одночасно. Таким чином, крива 1 показує залежність SNR від m тільки при квантовому шумі і розрахована для р-і-п ФД:

$$SNR_{кв} [\text{дБ}] = 10 \log \left(\frac{1/2 m^2 I_{cp}}{2q \Delta f_{ef}} \right). \quad (2.6)$$

Крива 2 показує залежність SNR від m при наявності квантового шуму, шуму підсилювача, відносного шуму інтенсивності ВІШ, при відсутності ІМС. При розрахунках рівень спектральної щільності ефективного шумового струму підсилювача, що стоїть за фотодетектором прийнятий 50 ПА2 / Гц, а фототок прийнятий рівним 10 мкА.

Крива 3 показує залежність SNR від m при шумі кліппування, наприклад, коли груповий багатоканальний сигнал виходить за межі лінійної частини передавальної характеристики оптичного модулятора [24].

$$SNR_{кл} [\text{дБ}] = 10 \log \left(\sqrt{2\pi} (1/\mu)^3 \exp(1/2\mu^2) \right). \quad (2.7)$$

Крива 4 показує залежність SNR від m при інтермодуляційних шумах в каналах. Як приклад показані ІМС третього порядку найнебезпечніші для таких систем, розраховані за апроксимуючою формулою.

$$SNR_{IMC} [\text{дБ}] = 10 \log \left(\frac{32 - 3(\mu/\sqrt{2})^2 \pi^2}{3(\mu/\sqrt{2})^2 \pi^2} \right) - 4. \quad (2.8)$$

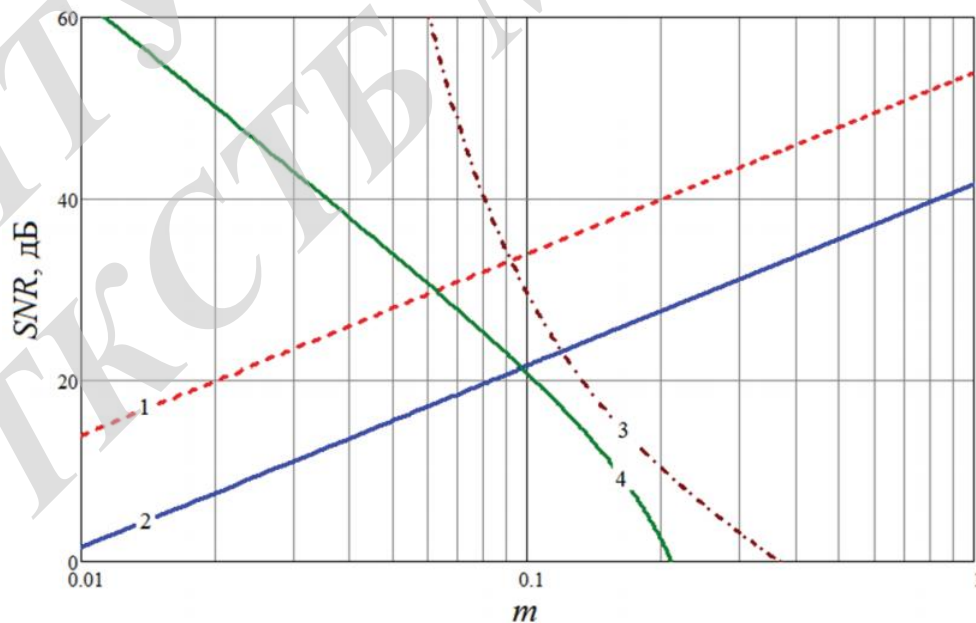


Рисунок 2.4 - Залежність SNR від глибини оптичної модуляції для 32-канальної системи передачі: 1 - $SNR_{кв}$; 2 - SNR , розраховане по (3.1) без урахування ІМС; 3 - $SNR_{кл}$; 4 - SNR_{IMC}

Як видно з рис. 2.4 верхня межа SNR , в основному, визначається квантовим шумом, який є як в присутності оптичного сигналу, так і в його відсутності, і двома явищами: Кліпування в оптичному модуляторі та ІМІ. Зі збільшенням m , збільшується потужність корисного сигналу, але одночасно збільшуються перешкоди через кліпування та ІМІ третього порядку, в основному, через нелінійність оптоелектронних модулів. Зауважимо, що явище кліпування конкурує з ІМІ третього порядку. Отже, вибір оптимального значення m залежить від реальних характеристик системи. Так, наприклад, з наведеного прикладу для $N = 32$ видно, що для оптимального прийому сигналу необхідно вибрати глибину оптичної модуляції на один канал між значеннями 0,08 і 0,1. При цьому величина SNR перевищує 20 дБ.

Зі збільшенням кількості каналів домінуючими можуть стати ІМС третього порядку. На рис. 2.5 показані залежності SNR від m при $N = 256$. У цьому випадку оптимальне значення глибини модуляції зменшується і становить $m \approx 0,046$, а величина SNR становить 14,8 дБ. Далі буде показано, що дане співвідношення сигналу до шуму не дозволяє з високою вірогідністю приймати сигнал (коефіцієнт помилок $BER \geq 10^{-12}$), в таких випадках необхідно використовувати методи коригувального кодування сигналів.

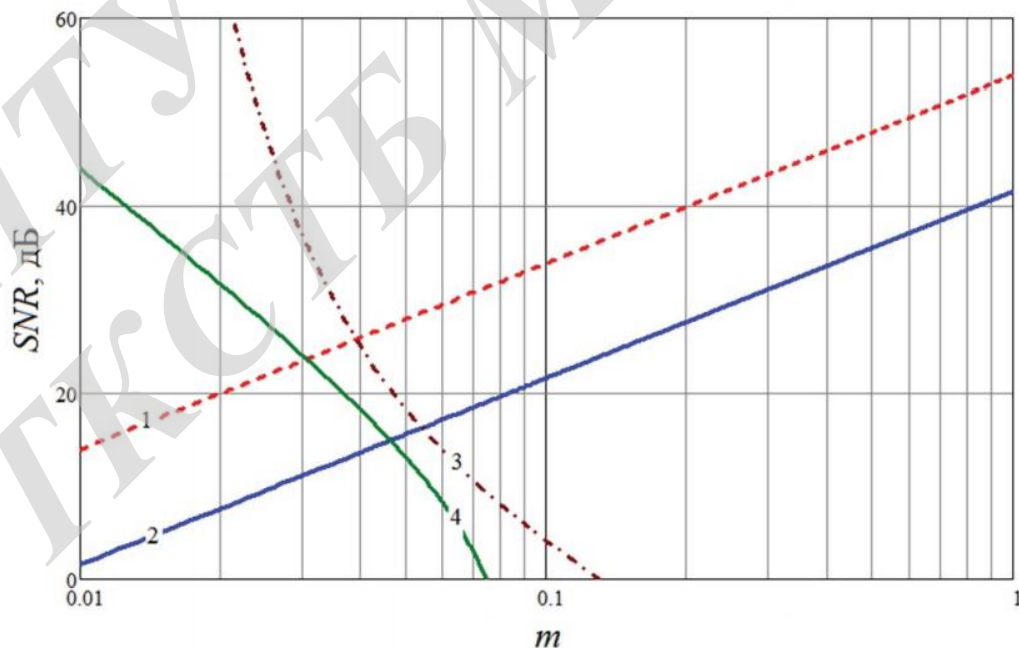


Рисунок 2.5 - Залежність SNR від глибини оптичної модуляції для 256-канальної системи передачі: 1 - $SNR_{кв}$; 2 - SNR , розраховане по (3.1) без урахування ІМС; 3 - $SNR_{кліп}$; 4 - $SNR_{ІМС}$

Отримані результати показують, що зменшення SNR через вкладу ВІШ і еквівалентного шуму приймача становить близько 15 дБ від значення квантового обмеження і що при вимозі $SNR \geq 17$ дБ система функціонує при сильних ІМС третього порядку, а при використанні прямої модуляції випромінювання ЛД - ближче до межі кліппування. Стосовно до прямої модуляції, подальше поліпшення лінійності ВАХ ЛД не дасть відчутних результатів у збільшенні SNR . Переходом на зовнішню модуляцію можна збільшити вихідну потужність оптичного сигналу і спробувати зменшити рівні шумів ОІШ і особливо ІМІ третього порядку.

Для зручності оцінки якості сигналу на приймальній стороні замість величини SNR вводиться параметр, званий показником якості сигналу або Q-фактором [15]:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (2.9)$$

де I_1 і I_0 середні значення фотоструму при передачі логічної «1» і «0», відповідно, а σ_1 і σ_0 середньоквадратичне відхилення шуму при передачі логічної «1» і «0», відповідно. В цьому випадку логічної «1» буде відповідати присутність оптичного імпульсу, а «0» - відсутність імпульсу. Очевидно, що формула (2.9) справедлива для імпульсних сигналів. Для сигналів з багаторівневими форматами модуляції також можна ввести поняття Q-фактора. Якщо розглядати пряме фотодетектування оптичного сигналу і ідеальну демодуляцію підносійної в електричній частині приймального обладнання, то різниця $I_1 - I_0$ буде характеризувати відстань між символами для певного підносійного каналу. Для різних форматів модуляції ця різниця буде відрізнятися в залежності від рівня сигналу в певні моменти часу, що відповідають моментам часу прийняття рішення. Щоб визначити самі найгірші умови прийому багаторівневого сигналу досить розглянути найменшу відстань між символами. При нормуванні сузір'їв символів багаторівневого сигналу мінімальна відстань між символами фотоструму інформаційного сигналу $(\Delta I)_{\min}$ для форматів модуляції BPSK і ASK становить 2 і 1, відповідно, а для L- позиційного сигналу визначається:

$$(\Delta I)_{\min} = \sqrt{2} / (\sqrt{L} - 1). \quad (2.10)$$

Формула (2.9) перетвориться:

$$Q = \frac{(\Delta I)_{\min}}{\sigma_1 + \sigma_0}. \quad (2.11)$$

До зниження показника якості сигналу в піднесутих каналах призводить багато чинників: дисперсія і нелінійні явища в оптичному волокні, що не ідеальність оптоелектронного і електрооптичних перетворення на передавальній і на приймальній стороні, шуми оптичних і електричних підсилювачів, що використовуються як в оптичному тракті, так і після ФД.

Існує певна функціональна залежність Q-фактора сигналу і вимірюваного коефіцієнта помилок *BER* (Bit Error Rate).

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (2.12)$$

де *erfc* (*x*) - допоміжна функція інтеграла помилки.

Якщо задано необхідне значення *BER*, то користуючись виразом (2.12) можна знайти необхідне значення Q-фактора. Часто замість прямого значення Q - чинники призводять його логарифмічний еквівалент $Q \text{ [дБ]} = 20 \log Q$. На рис. 2.6 показана залежність *BER* від Q-фактора (крива 1), розрахована за формулою (2.12). При проектуванні і розрахунку сучасних ВОСП закладаються досить жорсткі вимоги на *BER*, наприклад $BER \leq 10^{-12}$, що відповідає $Q \geq 7$ або, в одиницях виміру дБ: $Q \geq 17$ дБ.

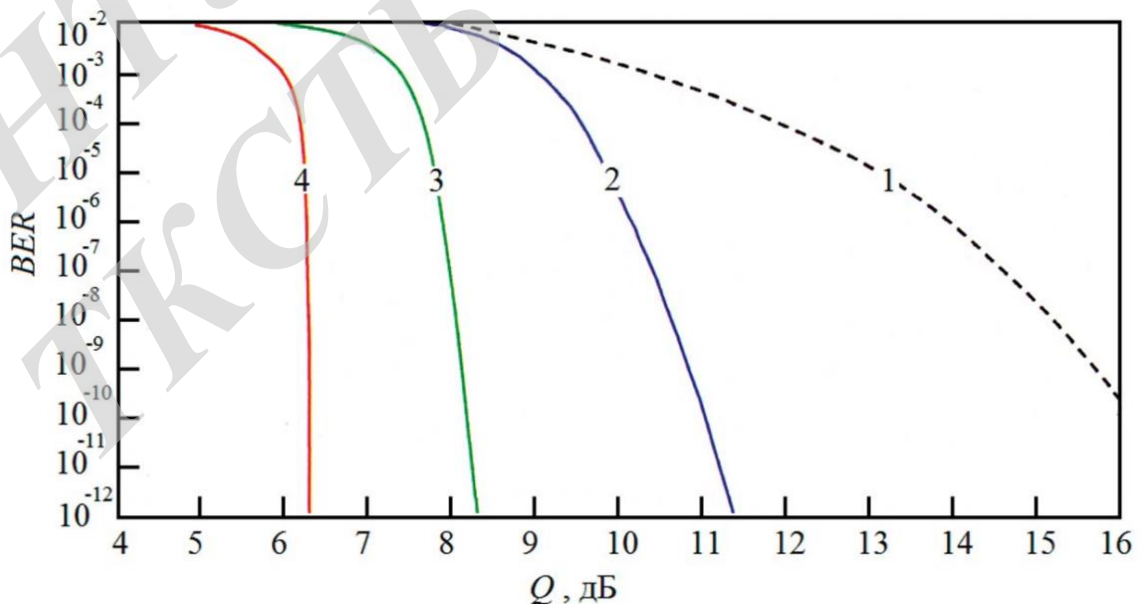


Рисунок 2.6 - Залежність *BER* від Q-фактора: 1 - без застосування FEC; 2 - FEC 1-го покоління; 3 - FEC 2-го покоління; 4 - FEC 3-го покоління

Відзначимо, що нарощування пропускної здатності оптичних мереж доступу за допомогою збільшення числа частотно-розділених каналів і застосування в цих каналах багаторівневих форматів модуляції негативно відбивається на BER . Одним із способів підвищення перешкодозахищеності сигналів є застосування кодування сигналу на передавальній стороні і декодування на приймальній стороні. Така пряма або упереджувальна корекція помилок FEC різко підвищує якість роботи системи передачі, зокрема зберігає необхідну величину BER при менших величинах Q -фактора [21].

Існують різні методи реалізації кодеків FEC. Широке застосування в заводостійкого кодування отримали коди Ріда-Соломона (Reed-Solomon) $RS(n, k)$. Алгоритм кодування полягає в тому, що для кожного блоку, що складається з k байт даних, обчислюється контрольний блок з $(n - k)$ байт і приєднується до них, доповнюючи фрагмент до n байт. Ця послідовність з n байт передається по всьому волоконно-оптичному тракту і на приймальній стороні, після демультимплексування сигналів за допомогою декодера виправляються помилки, якщо вони виникають в волоконно-оптичному тракті. Можливо виправлення до $(n-k)/2$ байт даних. Так, наприклад, в перших поколіннях FEC використовується $RS(255,239)$, надмірність якого становить $(255-239)/239 \approx 6,7\%$.

На рис. 2.6 показана залежність BER від Q -фактора для FEC 1-го покоління (крива 2). Як бачимо з рис. 2.6 необхідна величина Q -фактора для досягнення величини $BER = 10^{-12}$ в порівнянні з кривою 1 (без застосування FEC) зменшилася і становить близько 11 дБ. Таким чином, при використанні FEC 1-го покоління виграш в Q -факторі становить близько 6 дБ. Застосування FEC 2-покоління дозволяє ще збільшити виграш в Q -факторі. При цьому для досягнення величини $BER = 10^{-12}$ досить забезпечити $Q = 8,5$ дБ.

Зауважимо, що використання FEC призводить не тільки до збільшення бітової швидкості, але і до збільшення рівня шуму в зв'язку з розширенням спектра сигналу.

Однак для мереж доступу головним критерієм вибору технології може стати вартість обладнання, що використовує апаратні кодери/декодери з компонентом у вигляді мікросхем. Вибір рівня складності реалізації FEC пов'язаний техніко-економічними факторами. Відзначимо, що на сьогоднішній день в магістральних лініях зв'язку широко використовуються ефективні кодери/декодери на швидкостях передачі 10 Гбіт/с.

Зауважимо, що джерелом перешкод може стати і фотодіод через нелінійну (квадратурну) залежність фотоструму від оптичного поля. Це небажане явище виникає при фотодетектуванні односмугових сигналів. Перешкоди з'являються внаслідок нелінійної взаємодії (биття) підносійних під час фотодетектування. В результаті чого з'являються низькочастотні (щодо сигналів) шуми биття (SSBI - signal to signal beat interference) виду $\Omega_i - \Omega_j$, де $i = 1, 2, \dots, N$, Ω_i, Ω_j - центральні частоти підносійних каналів, N - кількість каналів. Однак через дисперсію оптичного волокна при фотодетектуванні з'являються також високочастотні шуми биття виду $\Omega_i + \Omega_j$, які проаналізовані в розділі 4. Розглянемо фотодетектування оптичного односмугового сигналу, що містить частотно-розділені підносійні канали:

$$E(t) \approx \frac{E_0}{\sqrt{2}} \left\{ \sin \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^N m_i \cos [(\omega_0 + \Omega_i)t] \right\}. \quad (2.13)$$

На приймальній стороні після фотодетектування фотострум пропорційний інтенсивності [51], тобто пропорційний значенню $(E(t))^2$, усередненим по відрітку часу T , більшого в порівнянні з періодом оптичного поля (усереднення позначено кутовими дужками):

$$I: \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (E(t))^2 dt = \langle I_0 \rangle + \langle I_S \rangle + \langle I_{SSBI} \rangle, \quad (2.14)$$

де

$$\langle I_0 \rangle = \frac{E_0^2}{4}, \quad \langle I_S \rangle = \frac{E_0^2}{2\sqrt{2}} \sum_{i=1}^N m_i \cos \left[\left(\Omega_i t - \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (2.15)$$

$$\langle I_{SSBI} \rangle = \left\langle \frac{E_0^2}{8} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^N m_i \cos [(\Omega_i - \Omega_j)t] \right\}^2 \right\rangle = \langle I_3^{\cdot} \rangle + \langle I_3^{\cdot\cdot} \rangle, \quad (2.16)$$

$$\langle I_3^{\cdot} \rangle = \frac{E_0^2}{8} \sum_{i=1}^N m_i^2, \quad \langle I_3^{\cdot\cdot} \rangle = \frac{E_0^2}{8} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N m_i m_j \cos [(\Omega_i - \Omega_j)t]. \quad (2.17)$$

Остаточно:

$$I: \frac{E_0^2}{4} + \frac{E_0^2}{2\sqrt{2}} \sum_{i=1}^N m_i \cos \left[\left(\Omega_i t - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \frac{E_0^2}{8} \sum_{i=1}^N m_i^2 + \frac{E_0^2}{8} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N m_i m_j \cos \left[\left(\Omega_i - \Omega_j \right) t \right]. \quad (2.18)$$

Таким чином, фотострум містить постійну складову, сигнали підносійних частот, а також частотні складові виду $\Omega_i - \Omega_j$, де $i = 1, 2, \dots, N$. Від постійної складової позбуваються за допомогою схемних рішень. Підносійні сигнали, в найпростішому випадку, можна виділити за допомогою смугових фільтрів, а позбутися від частотних складових $\Omega_i - \Omega_j$ вкрай важко, якщо вони потрапляють в смуги пропускання піднесуть, що знаходяться в низькочастотній частини спектра. Особливо шкідливі ці шуми биття при фотодетектуванні OFDM сигналу і доводиться залишати захисну смугу в низькочастотній області спектра. З (2.18) випливає, що загальна кількість цих небажаних частотних складових одно поєднанню з N частот по два, тобто $C^2_N = N(N-1)/2$. Більш того, якщо підносійні частоти розподілені рівномірно в частотній області з кроком $\Delta\Omega$, то $\Omega_i - \Omega_j = i \cdot \Delta\Omega$ і з (2.18) випливає, що при $i=1$ кількість складових буде $(N-1)$, при $i = 2 - (N-2)$ і т.д., тобто їх кількість зменшується зі збільшенням частоти. Також випливає, що рівні шумів биття нижче рівнів піднесуть сигналів і пропорційні m^2_i .

Однак не можна не брати до уваги, що оптичне поле, яке фотодетектується на приймальній стороні зазнає фазові спотворення при поширенні по дисперсійному волокну. При цьому з'являються не тільки частотні складові виду $\Omega_i - \Omega_j$, а також виду $\Omega_i + \Omega_j$. Як показано в розділі 4, вони можуть потрапити в діапазон частот піднесуть, причому, чим вище частоти піднесуть, тим вище рівень шумів. Таким чином, в найгіршому стані опиняються підносійні, розташовані останніми по частотному спектру. У разі якщо смуга багатоканального сигналу не перевищує октаву, ці шуми не потрапляють в смугу пропускання підносійних.

Якщо передбачені заходи для мінімізації шумів биття, а також обрані помірні значення глибини модуляції, то можна вважати, що фотодетектування відбувається лінійно і можна скористатися наближеною формулою для визначення фотоструму для піднесуть каналів, наступної з (2.18):

$$I: \frac{E_0^2}{4} \left\{ 1 + \sqrt{2} \sum_{i=1}^N m_i \cos \left(\Omega_i t - \frac{\pi}{4} \right) \right\}; \quad (2.19)$$

$$I: I_0 \left\{ 1 + \sum_{i=1}^N (m_i \cos(\Omega_i t) + m_i \sin(\Omega_i t)) \right\}, \quad (2.20)$$

де $I_0 \sim P_0 \sim E_0^2 / 4$ - середній фотострум, який визначається через середню оптичну потужність на вході ФД.

Вираз (2.20) зручно використовувати у випадках квадратурного уявлення фозомодульованих або багаторівневих підносійних сигналів, коли необхідно розглянути стійкість сигналу в двовимірній фазовій IQ-діаграмі.

2.2 Пряме фотодетектування оптичних односмугових сигналів з частотним розподілом підносійних каналів різного формату модуляції

Останнім часом в телекомунікації широко застосовуються односмугові оптичні методи модуляції, що дозволяють формувати односмугові канали на різних довжинах хвиль і, таким чином, ефективно розміщувати спектральні канали в смузі пропускання волоконно-оптичного лінійного тракту. Крім того спектральну ефективність можна збільшити розміщуючи в цих оптичних смугах сигнали підносійних каналів різного формату.

Однак, в ВОСП з прямим детектуванням сигналу, в процесі детектування односмугового оптичного сигналу виникають так звані інтерференційні шуми між підносійними [23]. Їх часто називають шумами биття між підносійними (SSBI). Через те що спектр цих шумів розташовується в низькочастотній області, виникають труднощі використання всієї смуги пропускання оптичного модулятора [28]. Таким чином, при формуванні оптичного сигналу доводиться залишати захисну смугу між багатоканальним SCM сигналом і оптичної носійної, щоб після фотодетектування шуми биття не потрапляли в смуги підносійних каналів.

Таким чином, шуми биття між підносійними не дозволяють використовувати всю смугу пропускання волоконно-оптичного лінійного тракту. Одним із способів збільшення спектральної ефективності є збільшення смуги сигналу за рахунок зменшення захисної смуги. У цьому випадку виникає необхідність спрогнозувати спектральний розподіл шумів биття в підносійних каналах. Нижче запропонована математична модель для розрахунку рівнів шумів биття і їх спектрального розподілу, що дозволяє оцінити їх вплив на підносійні канали різного формату модуляції при

прямому детектуванню оптичного сигналу, а також знайти технічні рішення для мінімізації впливу цих шумів. Критерієм якості сигналу в підносійних каналах прийнятий Q-фактор, який оцінюється на виході фотодетектора. При виведенні формул врахований факт дискретності шумів биття і їх кількість, що потрапляють в канали. Розглядаються підносійні канали з різними форматами модуляції: BPSK, ASK, QPSK, QAM.

Розглянемо процес фотодетектування односмугового сигналу, що складається із множини підносійних. На рис. 2.7 показаний нормований спектр оптичного поля сигналу, отриманий при односмуговій модуляції носійної (на частоті f_0) N-канальним груповим сигналом. Частотам $f_0 + f_i$, де $i = 1, 2, \dots, N$ відповідають центральні частоти підносійних каналів. Як видно з рис. 2.7 при нормуванні рівня носійної, рівні підносійні складають $m_i/2$, де m_i - глибина оптичної модуляції в i -м підносійному каналі. Для спрощення аналізу припустимо, що рівні всіх підносійних на передачу рівні. Нормування не впливає на подальший аналіз, так як інтерес представляє рівень шумів щодо сигналів.

Як показано в [28] шум биття між підносійними виникає через нелінійний процесу змішування при фотодетектуванні оптичного поля підносійних. Відзначимо, що складова оптичної носійної на частоті f_0 не бере участі в формуванні шуму. Таким чином, щоб визначити шум биття між підносійними необхідно детектувати оптичний сигнал в смузі частот B (від $f_0 + f_1$ до $f_0 + f_N$) без урахування оптичної носійної на частоті f_0 .

Зручніше уявити багатоканальний сигнал в діапазоні частот від $f_0 + f_1$ до $f_0 + f_N$ в комплексному вигляді. На рис. 2.8а) схематично зображено форма нормованого спектра цього сигналу в комплексному поданні.

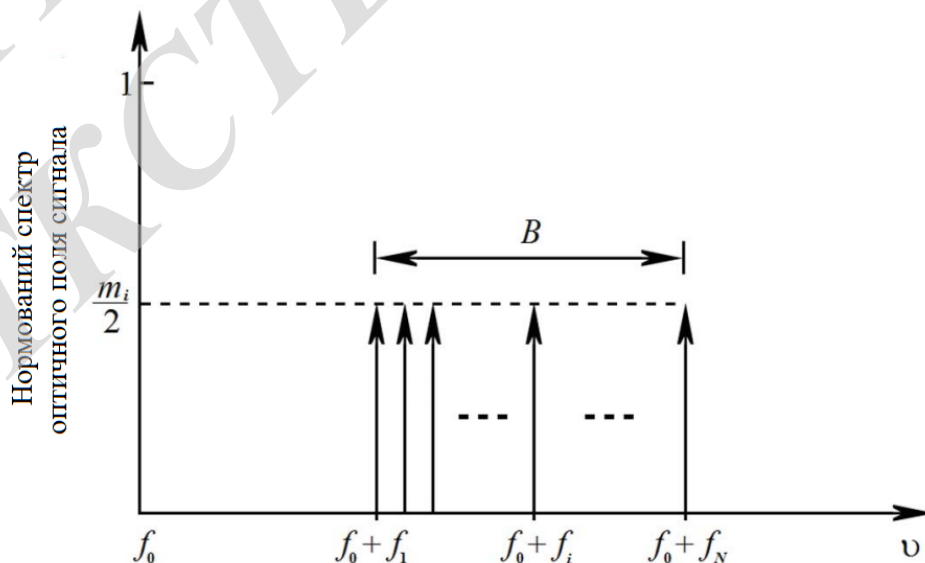


Рисунок 2.7 - Нормований спектр оптичного поля односмугового сигналу

Як видно з рис. 2.8 а) сума підносійних має рівномірний спектр прямокутної форми з смугою $B = f_N - f_1$, що характерно для дуже близько розташованих підносійних в OFDM-сигналі. Однак, при виведенні основних формул, врахуємо дискретний характер спектра. Як видно з рис. 2.8а) нормовані значення комплексних амплітуд підносійних рівні $m_i/4$.

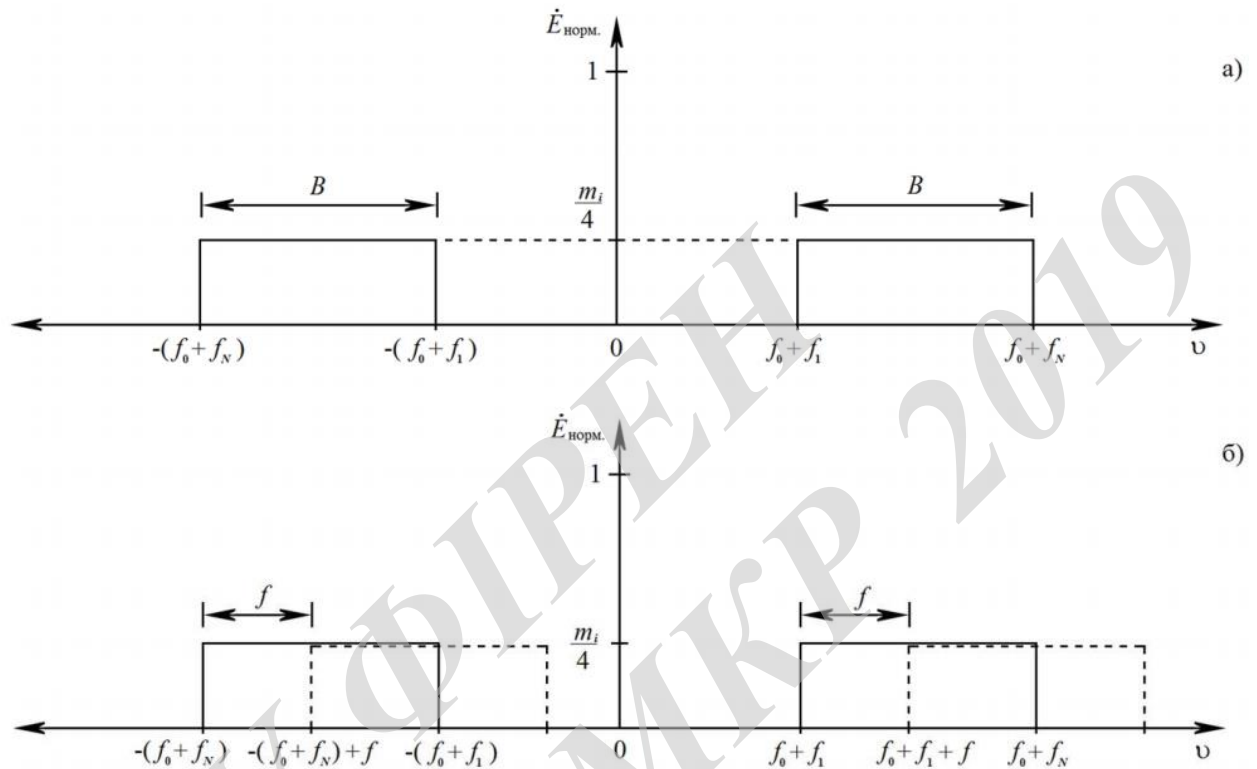


Рисунок 2.8 - Нормований комплексний спектр оптичного поля сигналу в діапазоні частот $(f_0 + f_1) \div (f_0 + f_N) - а$); пояснення до пакунку спектрів - б)

Таким чином, оптичне поле, форма спектра якого показана на рис. 2.8а), падає на зіницю фотодіода. Відомо, що вихідний струм фотодіода пропорційний інтенсивності падаючого випромінювання, тобто пропорційний квадрату напруженості оптичного поля, усередненим по відрітку часу, більшого в порівнянні з періодом оптичного поля. У комплексному поданні оптичного поля сигналу на вході фотодіода, що виникає на виході середній рівень струму шуму (noise) биття визначається:

$$I_{\text{noise}} ; \frac{1}{2} \left| \frac{g}{E} \right|^2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{g}{E} \cdot E^* \right\}, \quad (2.21)$$

де $\overset{g}{E}, E^*$ - комплексна і сполучена її амплітуди оптичного поля підносійної, що залежать від часу.

Для визначення спектрального розподілу фотоструму шуму биття скористаємося теоремою про пакунки [21]:

$$I_{noise}(f) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \overset{g}{E}(v) \overset{g}{E}(v-f) dv. \quad (2.22)$$

На рис. 2.8б) показані спектри $\overset{g}{E}(v)$ (суцільними лініями) і $\overset{g}{E}(v-f)$ (пунктирними лініями) для випадку, коли $0 < f \leq (f_N - f_1)$. Область значень $f > (f_N - f_1)$ не розглядаємо, тому що при змішуванні в фотодетекторі підносійних з оптичною носійною складовою спектра на частотах $2f_0 + f_i + f_j$ ($i, j=1,2,\dots, N$) зникають при усередненні за часом. В інтегралі (2.22) значення комплексних амплітуд підносійних рівні $m_i/4$, отже, враховуючи область існування інтеграла (2.22), де спектри $\overset{g}{E}(v)$ і $\overset{g}{E}(v-f)$ перекриваються, маємо:

$$I_{noise}(f) = \frac{m_i^2}{16} (B-f). \quad (2.23)$$

На рис. 2.9а) показана форма спектра струму шуму биття, представлена (2.23). Як бачимо, шум зосереджений в низькочастотній області і приймає максимальне значення $(m_i^2 / 16) B$ при $f = 0$ (постійна складова). Зі збільшенням частоти шум биття лінійно убуває і зникає при $f \geq B$. Отже, для виключення попадання шуму биття в смугі підносійних каналів необхідно залишати захисну смугу величиною більше ніж B між частотою f_0 і груповим багатоканальним сигналом.

Однак в цьому випадку спектральна ефективність зменшується. Для її поліпшення можна збільшити смугу корисного групового сигналу за рахунок зменшення захисної смуги. Однак в цьому випадку шум биття потрапляє в частотні смуги каналів підносійних і спотворює сигнали. Крім цього, в реальних ВОСП спектр сумарного багатоканального сигналу в діапазоні частот від $f_0 + f_1$ до $f_0 + f_N$ може мати нерівномірну або дискретну форму, наприклад, коли частотний інтервал між підносійними більше смуги одного каналу. В цьому випадку безперервний спектр шуму биття, показаний на рис. 2.9а), перетворюється в дискретний. Отже, щоб оцінити вплив шуму биття на підносійні канали необхідно знати кількість продуктів шуму биття, що

потрапляє в смугу корисного сигналу, а також середній струм одного продукту шуму.

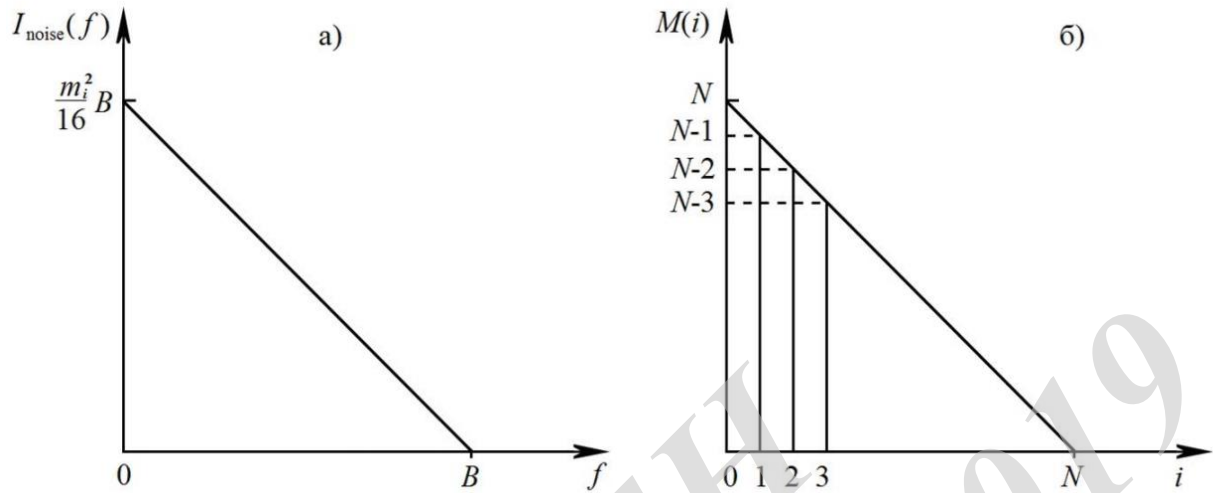


Рисунок 2.9 - Форма спектра струму шуму биття - а); кількість продуктів шуму биття в залежності від індексу частоти $f_i = i\Delta f$, де Δf - частотний інтервал між підносійними - б)

Будемо вважати, що оптичне поле групового сигналу з загальним спектром від $f_0 + f_1$ до $f_0 + f_N$ є сумою підносійних з рівними амплітудами і з частотним інтервалом між ними рівним Δf .

Небажаними є комбінаційні продукти виду $f_i - f_j$, де $i \geq j$, $i, j = 1, 2, \dots, N$. Очевидно, що максимальна кількість комбінацій N відповідає нульовій частоті, коли $i = j$. Комбінаційні продукти зникнуть на частотах вище $(f_N - f_1)$. На частоті Δf кількість комбінаційних продуктів складе $(N - 1)$, на частоті $2\Delta f$ - $(N - 2)$ і т.д. На частоті $N\Delta f$ - 0. На частоті $f_i = i\Delta f$ кількість комбінаційних продуктів $M(i)$ визначається:

$$M(i) = (N - i) \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.24)$$

На рис. 2.9б) показана залежність кількості комбінаційних продуктів виду $f_i - f_j$ від індексу частоти, де $i \geq j$, $i, j = 1, 2, \dots, N$. Зауважимо, що загальна кількість продуктів визначається за допомогою поєднання з N частот по два - $C_N^2 = N(N - 1) / 2$.

Таким чином, якщо в струмі шуму биття (3.24) вважати $B = N\Delta f$, а кількість продуктів N при $f = 0$, то спектральну щільність фотоструму легко визначити - $m_i^2 / 16$ (з розрахунку на один продукт шуму биття). Знаючи середнє значення фотоструму, відповідне одному небажаного продукту шуму биття і кількість цих продуктів, що потрапляють в частотну смугу

необхідного каналу можна оцінити сумарну величину шуму в каналі. Для оцінки сумарного значення шуму продуктів биття потрапляють в канал, розглянемо окремо випадки передачі через оптичне волокно OFDM-сигналу і багатоканального SCM сигналу.

При передачі OFDM-сигналу на виході фотодіода струми продуктів шумів биття, що потрапляють в смугу сигналу, мають однакові фази, отже - підсумовуються [28]. З урахуванням (2.24) спектральна щільність струму шуму биття в підносійному каналі з індексом i :

$$I_{noise}^{OFDM} = \frac{m_i^2}{16} (N-1) \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.25)$$

При передачі багатоканального SCM сигналу підносійні сигнали корельовані, не залежать одне від одного і мають випадкову фазу. Якщо припустити, що амплітуда струму одного продукту шуму биття при змішуванні в фотодіоді 2-х підносійних має випадковий розподіл з дисперсією $m_i^2 / 16$, то середньоквадратичне відхилення шуму суми M (i) комбінаційних частотних продуктів, що потрапляють в підносійний канал з індексом i :

$$I_{noise}^{SCM} = \frac{m_i^2}{16} \sqrt{N-i} \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.26)$$

На рис. 2.10 показаний приклад розподілу рівнів підносійних частот (криві 1) та по відношенню до них рівня шумів биття, що виникають після фотодетектування в залежності від індексу частоти. Крива 2 і крива 3 на рис. 2.10 відповідають спектральному розподілу шумів биття при фотодетектуванні односмугового OFDM сигналу і багатоканального SCM сигналу. Для побудови графіків використовували формули (2.25) і (2.26), в припущенні, що глибина модуляції всіх підносійних $m_i = 1 / N$ однакова, їх кількість $N = 32$ і що підносійні рівномірно розподілені в спектральній смузі, що відповідає індексам частот від 32 до 64.

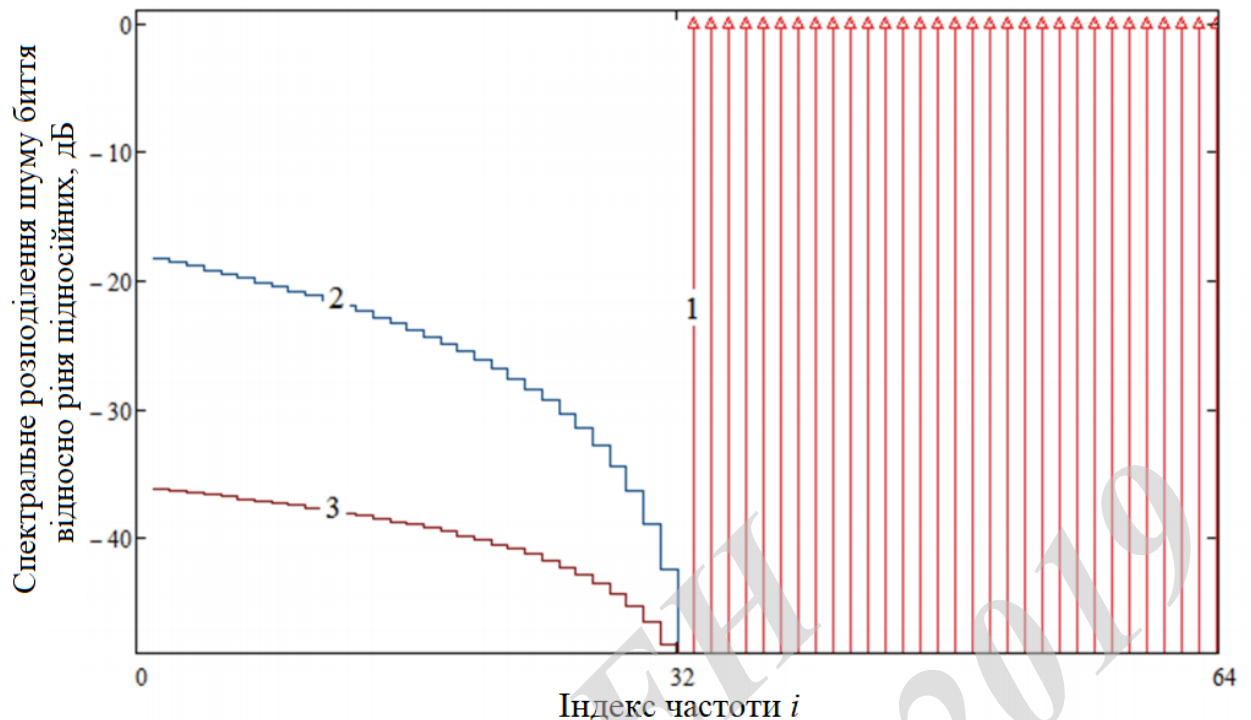


Рисунок 2.10 - Спектральний розподіл багатоканального сигналу (криві 1) та шумів биття при фотодетектуванні, якщо підносійні сигнали: OFDM (крива 2); SCM (крива 3)

Як бачимо з рис. 2.10 відносно потужні шуми биття виникають при фотодетектуванні OFDM сигналу. Їх спектральна смуга знаходиться в НЧ частини спектра і дорівнює ширині смуги OFDM сигналу. Для того щоб ці шуми не потрапили в смуги пропускання підносійної частот між оптичної носійної і частотою першого підносійного каналу передбачають захисну смугу рівну смузі OFDM сигналу. Для багатоканального сигналу SCM шуми биття набагато нижче рівня підносійних. Залежно від формату модуляції в каналах шуми биття можуть не надавати сильного впливу на показники якості сигналів, що дозволяє використовувати всю смугу пропускання (в разі, показаному на рис. 2.10 ця вся смуга між індексами частот від 1 до 64).

Відзначимо, що через хроматичну дисперсію при поширенні багатоканального сигналу через оптичне волокно відбувається спотворення рівнів підносійних після фотодетектування. Спектральна щільність струму сигналу в одному підносійному каналі дорівнює $m_i / 2$, де $m_i \leq 1 / N$. Через хроматичну дисперсію спектральна щільність струму в каналі зміниться за законом $-\cos(i^2\varphi_2)$ [28]. В процесі фотодетектування спотворені рівні підносійних призводять до зміни шуму биття по закону $-\cos(2i^2\varphi_2)$, де

$$i^2\varphi_2 = 2\pi^2\beta_2L(f_0 + f_i)^2, \quad (2.27)$$

характеризує дисперсію групового часу запізнювання сигналу на відстані L , β_2 - друга похідна постійної поширення на оптичній частоті f_0 , D - питома хроматична дисперсія оптичного волокна.

Отже, з огляду на вищесказане і $m_i \leq 1/N$, відношення сигналу до шуму биття при передачі OFDM-сигналу і багатоканального SCM сигналу, відповідно, визначаються:

$$SNR_{SSBI}^{OFDM} = \frac{8}{m_i(N-i)} \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{\cos(2i^2\varphi_2)} \geq \frac{8}{1-\frac{i}{N}} \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{\cos(2i^2\varphi_2)}, \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.28)$$

$$SNR_{SSBI}^{SCM} = \frac{8}{m_i\sqrt{N-i}} \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{\cos(2i^2\varphi_2)} \geq \frac{8\sqrt{N}}{\sqrt{1-\frac{i}{N}}} \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{\cos(2i^2\varphi_2)}, \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.29)$$

Як видно з (2.28) і (2.29), при $i \geq N$ шум биття відсутній. При передачі OFDM-сигналу в найгіршому по перешкодозахищеності стані знаходиться перший підносійний канал. В цьому випадку при великих значеннях N , порівнюючи (2.28) і (2.29):

$$SNR_{SSBI}^{SCM} \approx \sqrt{N} \cdot SNR_{SSBI}^{OFDM}. \quad (2.29)$$

Знаючи SNR в підносійному каналі після фотодіода, за допомогою (2.28) і (2.29) можна знайти Q-фактор для каналів з різними форматами модуляції:

$$Q_{SSBI}^{OFDM} \geq \frac{4(\Delta I)_{\min}}{1-\frac{i}{N}} \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{\cos(2i^2\varphi_2)}, \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.30)$$

$$Q_{SSBI}^{OFDM} \geq \frac{4\sqrt{N}(\Delta I)_{\min}}{\sqrt{1-\frac{i}{N}}} \frac{\cos(i^2\varphi_2)}{\cos(2i^2\varphi_2)}, \text{ при } 0 \leq i < N. \quad (2.31)$$

де $(\Delta I)_{\min}$ - мінімальна відстань між символами інформаційних даних.

Крім шуму биття і дисперсійних спотворень сигналу необхідно мати на увазі, що на приймальній і передавальній стороні присутній шум оптоелектронних модулів і інші шуми приймально-передавального тракту, включаючи нелінійний шум, що виникає через кліпування багатоканального сигналу. Ці та інші технічні шуми врахуємо в параметрі Q_0 - необхідному показнику якості підносійних, нехтуючи шумом биття і дисперсійних спотворень сигналу. Очевидно, що присутність шуму биття і хроматична дисперсія в волокні приведуть до зменшення сумарного Q-фактора в підносійному каналі і:

$$Q_{\Sigma} ; \frac{1}{1/Q_{SSBI} + 1/(Q_0 \cos(i^2 \varphi_2))}. \quad (2.32)$$

Розрахунки показують, що частотна смуга багатоканального сигналу обмежена знизу шумами биття, а зверху - хроматичної дисперсією. Таким чином, ефективність використання всієї смуги оптичного тракту зменшується. Актуальним завданням є збільшення смуги сигналу для поліпшення спектральної ефективності. Як видно з рис. 3.10 збільшення смуги сигналу можливо за рахунок зменшення ширини захисної смуги таким чином, щоб рівні шумів, що потрапляють в діапазон корисного сигналу, що не погіршували необхідні якісні показники самого сигналу. Чи можливо виняток захисної частотної смуги і передача в НЧ частини спектра піднесуть каналів, якщо так, то сигнали якого формату модуляції менш схильні до шумів биття? Відповідь на це питання дає розрахунок за формулами (2.31) - (2.32) для двох типів сигналів - багатоканального SCM сигналу і OFDM сигналу при різних форматах модуляції в піднесуть каналах і при заданій величині Q_0 , наприклад, $Q_0 = 19$ дБ.

Проводилися розрахунки для 64-канальної системи передачі з смугою багатоканального сигналу $B = 8192$ МГц і частотним інтервалом між підносійними 128 МГц. Передача оптичного односмугового сигналу відбувається на довжині хвилі 1550 нм по стандартному одномодовому оптичному волокну (SSMF - standard single mode fiber) на відстань 20 км.

На рис. 2.11 показані значення Q-фактора в піднесуть каналах при передачі багатоканального SCM сигналу. Розрахунки показують, що багатоканальний SCM сигнал можна передавати у всій смузі частот (без використання захисної смуги) для всіх розглянутих форматів модуляції в каналах, крім формату 256-QAM. При цьому каналні формати модуляції BPSK, ASK, QPSK можна використовувати без застосування завадостійкого

кодування, так як в каналах можна досягти коефіцієнта бітових помилок менше 10^{-12} без застосування FEC при $Q_{\Sigma} \geq 17$ дБ. Нагадаємо, що застосування технології завадостійкого кодування дозволяє при тих же умовах дотримання бітових помилок зменшити вимога до Q-фактору до 8,5 дБ.

Аналіз отриманих даних при розрахунках за формулами (2.31) - (2.32) показує, що використання каналних форматів модуляції L-QAM, де $L = 16, 64, 256$ можливо тільки із застосуванням FEC. При форматі модуляції 256-QAM необхідно передбачити захисну смугу $\sim 0,5B$.

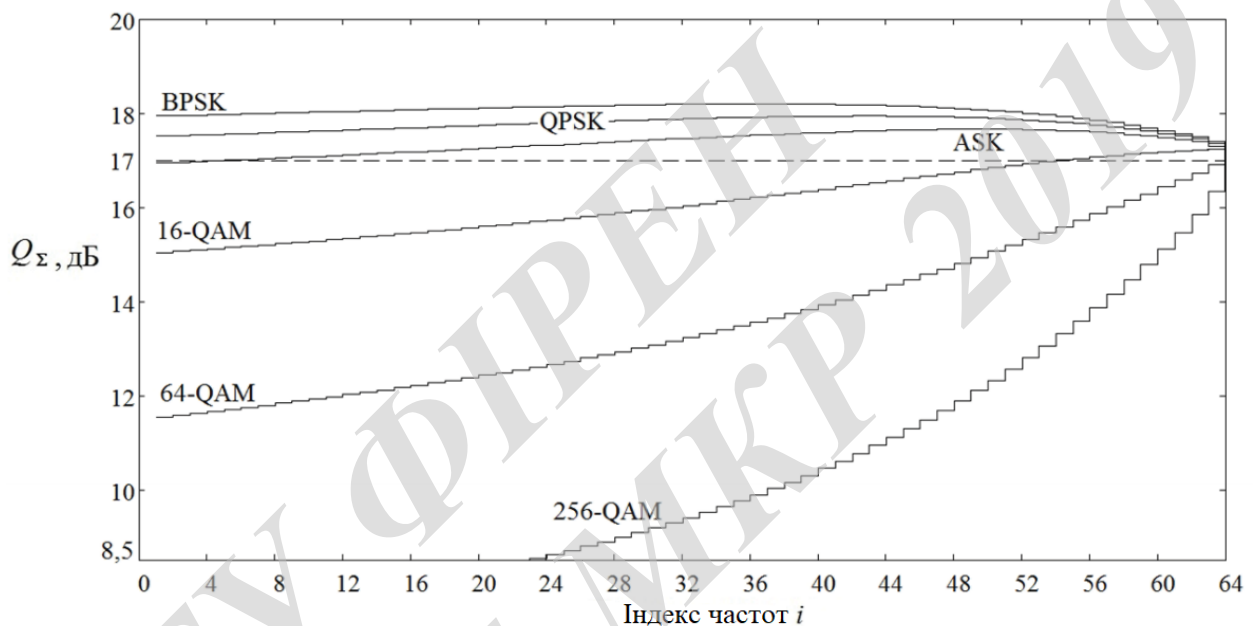


Рисунок 2.11 - Значення Q-фактора в 64 підносійних каналах різного формату модуляції при передачі багатоканального SCM сигналу без захисної смуги на відстань 20 км по одномодовому оптичному волокну

При передачі OFDM-сигналу ситуація по завадостійкості значно погіршується. На рис. 2.12 показані значення Q-фактора в підносійних каналах при передачі OFDM-сигналу. В цьому випадку використовувати всю смугу оптичного тракту можна тільки за умови застосування технології FEC в підносійних каналах формату модуляції BPSK, ASK, QPSK. Якщо є необхідність використання в каналах модуляцію QAM формату, то необхідно передбачити захисну частотну смугу між оптичної несучої і OFDM-сигналом. Наприклад, при форматі модуляції в підносійних каналах 16-QAM захисна смуга повинна становити більше 0,48B, при 64-QAM більш 0,77B, а при 256-QAM $\sim 1B$. Таким чином, збільшення ступеня «багаторівневості»

сигналу може привести до зменшення спектральної ефективності. Вибір певного формату модуляції залежить від області застосування системи передачі і техніко-економічних переваг.

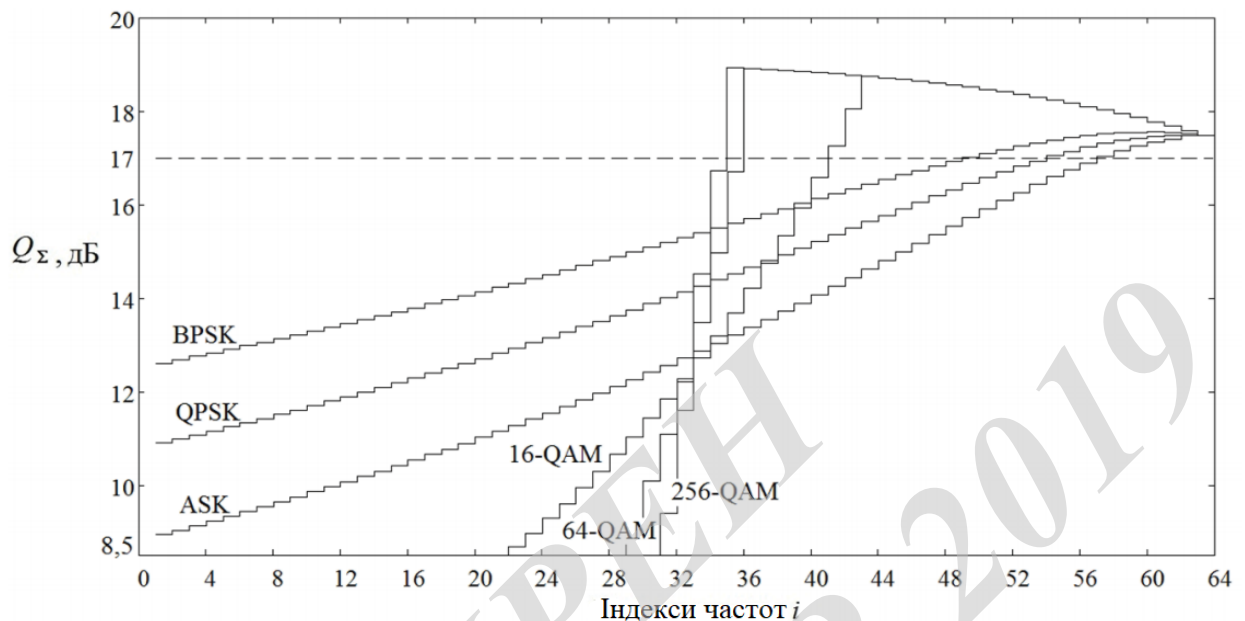


Рисунок 2.12 - Значення Q-фактора в 64 підносійних каналах різного формату модуляції при передачі OFDM-сигналу без захисної смуги на відстань 20 км по одномодовому оптичному волокну

2.3 Висновки до другого розділу

Досліджувалися параметри системи з частотним поділом каналів для оптимального фотодетектування підносійних.

1. Аналіз показав, що для збільшення чутливості фотоприймального пристрою переважно використовувати ЛФД. Показано, що для оптимального функціонування фотоприймального пристрою необхідно вибирати параметри роботи ЛФД враховуючи шумові характеристики підсилювача, що знаходиться після ФД. Наводяться розрахункові співвідношення для оптимального вибору основних параметрів фотоприймального пристрою.

2. Досліджувалася можливість оптимального вибору величини глибини оптичної модуляції підносійних m в залежності від реальних характеристик системи, так як зі збільшенням m , збільшується не тільки потужність сигналу, але і потужність нелінійних спотворень, пов'язаних з нелінійністю оптоелектронних компонент. Оціночні розрахунки показують, що при використанні прямого фотодетектування необхідно підтримувати глибину оптичної модуляції на один канал між значеннями 0,08 і 0,1, якщо кількість

підносійних не перевищує 32 і близько значення 0,04, якщо кількість тих підносійних становить 256. При великій кількості підносійних необхідно передбачити використання методів коригуючого кодування сигналів.

3. Запропоновано формули для поканальної оцінки Q-фактора при прямому фотодетектуванні, якщо через оптичне волокно передаються односмугові оптичні сигнали, що складаються з безлічі підносійних каналів різного формату модуляції. Розглядаються шуми биття між підносійними, що виникають через нелінійність ФД. Запропоновані формули засновані на дискретності продуктів шумів биття між підносійними в спектрі фотоструму, за допомогою чого розраховується їх кількість, яка потрапляє в заданий канал. Розглянуто можливість ефективного використання частотної смуги оптичного тракту при різних форматах модуляції в підносійних каналах. Показано, що при передачі незалежних підносійних каналних сигналів можливе використання всієї частотної смуги оптичного модулятора. Виняток становить передача підносійних в форматі 256-QAM, при якій необхідно передбачити захисну смугу. Передача сигналу в форматі QPSK краща з точки зору спрощення реалізації апаратури, так як не вимагає додаткового завадостійкого кодування сигналу. Проведені розрахунки показують значний вплив шуму биття між підносійними при передачі OFDM-сигналу. В цьому випадку необхідно застосовувати завадостійке кодування в каналах з форматами модуляції BPSK, QPSK, ASK. При передачі OFDM-сигналу, що складається з QAM підносійних, кодування не дає відчутної спектральної ефективності, тому що потрібно передбачити захисну смугу між оптичною носійною і OFDM-сигналом.

3 ПРИКЛАДИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ З ЧАСТОТНИМ РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ

3.1 Архітектура волоконно-оптичних мереж доступу з частотним розділенням каналів

Будівництво волоконно-оптичних мереж доступу трудомісткий і дорогий процес. Основні витрати при розгортанні мережі доступу припадають на будівельні роботи. Життєвий цикл оптоволоконної розподільної мережі має тривалий термін служби в порівнянні з активним мережевим обладнанням, особливо абонентським. Довговічність і великі витрати на побудову припускають високі вимоги до правильного проектування мереж доступу, тому що після впровадження мережі внесення змін зажадає великих витрат. У волоконно-оптичних мережах доступу з частотним поділом каналів використовуються три основні топології: «Кільце», «Зірка», «Дерево».

На рис. 3.1 показані приклади мережевого доступу за допомогою волоконно-оптичної розподіленої мережі з різними топологіями. Часто таку мережеву архітектуру називають гібридною. Кільцева топологія забезпечує з'єднання досить великих вузлів комутації (КК) з центральною станцією (ЦС). Існуючі міські опорні мережі в основному побудовані по кільцевій топології із застосуванням в кільці технології частотного поділу каналів (DWDM). Безперебійність мережі можна забезпечувати, використовуючи передачу сигналів по двох напрямках по кільцю (наприклад, по резервному волокну), що запобігає втраті зв'язку при різних пошкодженнях в оптичному лінійному тракті, а також при виході з ладу обладнання. Основним недоліком кільцевої топології в мережах доступу з частотним поділом каналів є труднощі масштабування архітектури в майбутньому при збільшенні числа КК. Відзначимо, що зв'язок опорної мережі доступу до регіональних або магістральними мережами відбувається через ЦС або КК.

Топологія «зірка» отримала широке поширення при наявності виділених оптоволоконних ліній від кожного кінцевого пристрою (ONU - optical network unit) або абонентського обладнання (ONT) до точки присутності (POP - point of presence). У системах з частотним поділом каналів такими точками можна вважати вихідні порти мультиплексора / демультиплексора (MUX/DMUX). Як MUX/DMUX можна використовувати впорядковані хвильові решітки (AWG). Ці пристрої широко застосовуються в сучасних ВОСП, випускаються у вигляді готових модулів, мають велику

щільність розміщення каналів в певному вікні. На рис. 3.1 до такої топології можна віднести ділянки мережі поза кільця, показані на рисунку з правого боку.

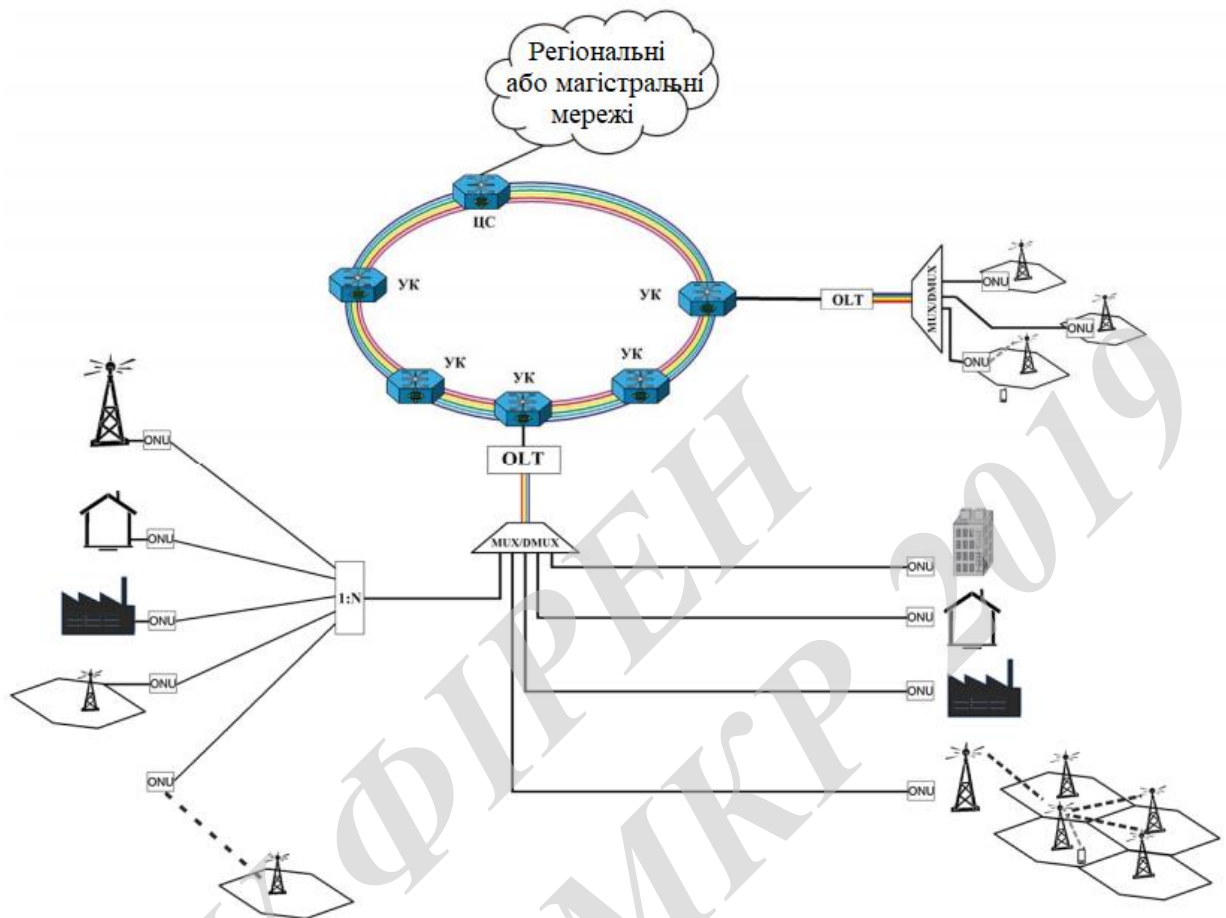


Рисунок 3.1 - Приклад волоконно-оптичної мережі доступу з частотним розділенням каналів

Прикладом деревовидної топології мережевого доступу є пасивна розподільна оптична інфраструктура (ODN - optical distribution network), широко використовувана в PON-мережах. У мережі використовуються пасивні оптичні розгалужувачі з коефіцієнтом розгалуження N , де $N = 4, 8, 16, 32, 64, 128$ число «гілок оптичного дерева» [17]. Типовою ділянкою такої топології PON мережі зображений на рис. 3.1 в лівій частині ділянки мережі поза кільцем.

Розрізняють спадний і висхідний напрямки трафіку. За зменшення (DS) приймається напрямок від OLT до ONU, а за збільшенням (US) - від ONU до OLT. У топології «зірка» трафік в двох напрямках, в основному, симетричний. У традиційних PON мережах з деревовидної топологією дані в низхідному напрямку передаються за принципом розсилки P2MP (point to multipoint) і вся смуга пропускання системи використовується всіма абонентами мережі. А в висхідному напрямку - за принципом множинного

доступу TDMA (time division multiple access) і смуга пропускання надається тільки одному абоненту на певний час. Використання R2MP дозволяє оптимізувати розміщення оптичних розгалужувачів виходячи з реального розташування абонентів, витрат на прокладку оптичного кабелю і адміністрування лінійно-кабельного господарства.

Тенденції розвитку телекомунікаційних послуг змушують задуматися про збільшення пропускну здатності існуючих мереж доступу без зміни або з незначними змінами оптичної інфраструктури мережі. Хмарне зберігання даних, відеоконференцій, перегляд відео в якості 3D HDTV (high definition TV), все це вимагає високої пропускну здатності мережі. Однак не тільки абонентський попит на послуги призводить до зростання трафіку, а також трафік від обчислювальної мережі фізичних предметів - інтернет-речей (IoT) - «розумних пристроїв/будинків/міст». Особливо важливу роль в стандартизації IoT грають бездротові мережі нового покоління. Якщо на початку розвитку IoT базувалася в основному на Bluetooth, Wi-Fi, далі на 2G-4G, то зараз розвиток цієї технології націлене на п'яте покоління мобільного зв'язку 5G, що забезпечує не тільки абонентів широкосмугового передачею даних (понад 10 Гбіт/с), а також використовує режими «device to device» (пристрій з пристроєм). Чи не швидкість передачі даних є визначальним фактором, а можливість масового підключення різних «розумних» пристроїв і безперебійність їх взаємодії є важливою умовою. На думку ряду експертів [17], мережі 5G будуть «пристрій - орієнтованими», а не «стілник - орієнтованими». Іншими словами, поняття «стілникового зв'язку» піде в минуле. Стілниковий зв'язок означає, що мережа оператора складається з стілників - базових станцій, що забезпечують зв'язок в певному радіусі дії (на рис. 3.1 стілники відображені у вигляді ромбів). Що знаходиться в цьому радіусі дії пристрій формує вихідний і спадний канали зв'язку, контролюючи як саме з'єднання, так і обсяг трафіку, що передається, в той час як базова станція управляє всім стілником, в якій знаходиться безліч абонентських пристроїв.

Очевидно, що оператори мереж доступу, особливо оператори бездротового зв'язку повинні вжити заходів для переходу до мереж нового покоління [29]. Безсумнівно, що ці заходи торкнуться інфраструктури мереж. Перевішивши всю інфраструктуру на оптичні розподілені мережі і, зробивши незначну реконструкцію оптичних мереж в плані заміни активного обладнання, можна забезпечити плавний перехід до мереж наступного покоління. Так, наприклад, на першому етапі можна перевести всіх абонентів і всі існуючі базові станції на пасивну розподілену оптичну мережу,

підключену до опорної кільцевої топології, як показано на рис. 3.1. На другому етапі модернізації мережі необхідно перейти до технологій частотного поділу каналів (DWDM, SCM) впроваджуючи в пасивну оптичну інфраструктуру MUX/DMUX і замінюючи активне обладнання. Очевидно, що застосування технології DWDM багаторазово збільшить пропускну здатність мереж доступу. Однак, застосування технології SCM переважно для бездротових операторів зв'язку, тому що забезпечує прості, але гнучкі можливості мультиплексування радіоканалів всіх поколінь радіозв'язку, включаючи IoT. При цьому спектральна ефективність використання радіочастотного частот збільшується. Застосування технології SCM також може забезпечити попит на високоякісні цифрові мультимедійними послуги. Відзначимо, що спільне використання технології DWDM і SCM представляє «економічну» транспортування і комутацію (в ВК або ЦС) використовуваних в бездротових системах зв'язку будь-яких радіоканалів по волоконно-оптичному тракту на досить великі відстані без використання будь-яких конверторів сигналів і координаційних протоколів. При цьому можливість КК одночасно передавати і приймати різноманітні інформаційні потоки з довільним розподілом трафіку переданих сигналів, відсутність синхронізації, відсутність протоколів передачі, прозорість каналів передачі дозволяють об'єднувати їх з іншими локальними і глобальними мережами різного призначення. Такі підходи до створення і розвитку мереж нового покоління поповнюють бурхливо розвивається глобальний ринок гнучких і широкосмтових мереж доступу.

У наступних параграфах розглядаються кільцеві і деревовидні топології волоконно-оптичних мереж доступу з частотним поділом каналів. Тут під каналами маються на увазі як оптичні, так і підносійні канали. Кільцеві топології можуть використовуватися на міських опорних мережах, де потрібно комутація обох видів каналів, а на ділянках від ВК до абонентських або кінцевих пристроїв можна використовувати пасивну деревоподібну оптичну інфраструктуру. Розроблено структурні схеми ВК і абонентських / кінцевих пристроїв.

3.2 Відмовостійка кільцева опорна мережа, що використовує переприймання підносійних каналів в вузлах

Зростаючі потреби обміну різноманітними послугами з різними швидкостями передачі в сучасних оптоелектронних інформаційних системах і мережах змушують шукати альтернативу традиційним мереж. При побудові

таких систем необхідно передбачити їх відмовостійкість, особливо якщо мова йде про відмовостійкість опорних мереж. Тут під «відмовостійкістю» розуміється властивість мережі зберігати свою працездатність у разі виходу з ладу (збою) окремих елементів і модулів мережі. Збої в роботі мереж можуть бути викликані природними катаклізмами, а також інспіровані людиною. Одним із способів забезпечення відмовостійкості є резервування або дублювання модулів і елементів мережі. Важливим фактором у цьому випадку стає «глибина» резервування або дублювання, яка веде до подорожчання мережі в цілому.

У даній роботі розглядається відмовостійка кільцева волоконно-оптична опорна мережа доступу, яка використовує переприймання підносійної на проміжних вузлах комутації (далі - ВК) [14, 41]. Структурна схема мережі показана на рис. 3.2. Мережа складається з подвійного волоконно-оптичного кільця, до якого за допомогою керованих оптичних комутаторів (ОК) підключені N ВК. На відміну від мережі на рис. 3.1 в даній мережі відсутня центральна станція (ЦС), і функції ЦС рівномірно розподілені між N ВК, що набагато піднімає надійність системи.

Кожен ВК має дві пари оптичних приймачів (Rx-Receiver) і передавачів (Tx - Transmitter), які працюють в «дзеркальному режимі» - одна пара працює за годинниковою стрілкою (ЗГС), а інша пара - проти годинникової стрілки (ПГС). При виході з ладу однієї пари: приймача і передавача по одному з напрямків, вузол продовжує працювати з парою приймача і передавача за іншим напрямком. Така структура вузлів забезпечує відмовостійкість мережі при виході з ладу ВК і при обриві волокна.

Слід зазначити, що по волоконно-оптичному кільцю поширюється сигнал на одній оптичній довжині хвилі, тобто кожна пара вузлових приймачів і передавачів налаштована на одну і ту ж хвилю, що дає можливість уніфікувати оптичні модулі обладнання. Вузлові ОК не є селективними по довжині хвилі. Для пояснення режимів роботи ОК на рис. 3.3 показані випадки нормального функціонування ВК і при виході з ладу приймально-передавального модуля ВК. Для наочності припускаємо що ОК складається з двох 1×2 оптичних перемикачів (обведені пунктирними лініями), що мають 3 порти і підключених в розрив оптичного волокна як показано на рис. 3.3 (оптичні порти 3 і 3' з'єднані між собою).

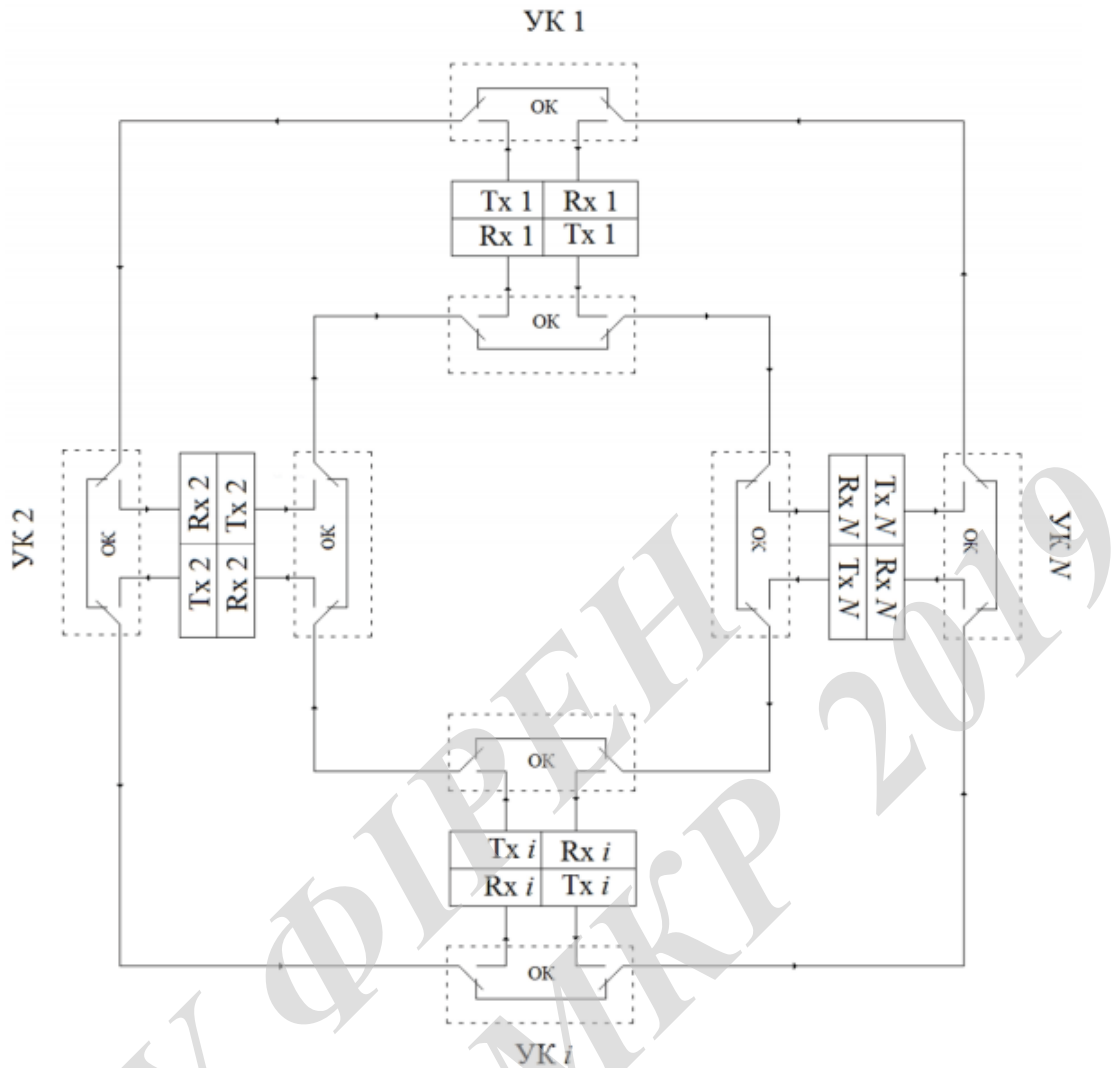


Рисунок 3.2 - Структурна схема кільцевої волоконно-оптичної опорної мережі доступу

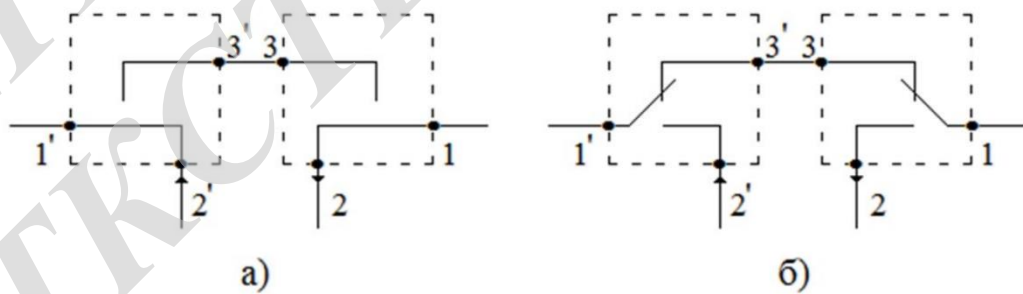


Рисунок 3.3 - Режими функціонування оптичного комутатора:
а) - нормальний режим функціонування; б) - режим ізоляції ВК

Управляються ОК електричними сигналами, виробляють людські в самих ВК. Як видно з рис. 3.3 при нормальному функціонуванні опорної мережі в кожній одиниці ОК порт 1 (1') скомутований з портом 2 (2'). Для прийому сигналів використовується один з ОК вузла, де оптична потужність

з порту 2 надходить на вхідний порт приймача вузла (Rx). При передачі оптичний сигнал передавача (Tx) вузла надходить на порт 2' і вводиться в волоконне кільце (на порт 1') з малими втратами для передачі до сусідніх вузлів. При виході з ладу вузла належать цьому вузлу ОК переключаються з порту 2 (2') на порт 3 (3') за допомогою керованого напруги так, що оптичний сигнал з входу вузла передається сусіднім вузлам НЧС і ППВ, минаючи несправний вузол.

На сьогоднішній день ринок представлений величезною кількістю реалізацій ОК, заснованих на різних технологіях комутації, наприклад, наведених в [29].

Основними вимогами до параметрів ОК є:

- внесене згасання (insertion loss) < 0.7 дБ;
- перехресне вплив між портами ОК (crosstalk) < -50 дБ;
- рівень зворотного відображення (back reflection) < -50 дБ;
- час перемикання (switching time) < 10 мс;
- кількість перемикань (durability) $> 10^9$ циклів і т.д.

Особливість даної кільцевої топології мережі полягає в тому, що при нормальному режимі функціонування вузла через не ідеальності ОК виникають перехресні впливи між портами ОК, наприклад, незначна частина потужності (менше -50 дБ) переходить з порту 1 на порт 1'. Вона поширюється до наступного ВК, де в ОК цього ВК слабшає в стільки ж разів (при ідентичних характеристиках ОК) і інтерферує з оптичним сигналом тієї ж довжини хвилі передавача даного вузла. Це може привести до появи інтерференційного шуму на приймальній стороні наступного вузла. Даний інтерференційний шум (в гіршому випадку) може мати максимальне значення, якщо інтерферуючі сигнали підсумовуються когерентно. Більш того, таке явище можна бачити на вході кожного приймача, де сигнал інтерферуючий «залишками» інтерфераційного шуму від різних вузлів, що циркулюють по кільцю, що призводить до збільшення інтерфераційного шуму в цілому. Якщо значення перехресного впливу між портами ОК не перевищує -50 дБ, то в практичних реалізаціях штрафом за потужністю через інтерферуючий шум можна знехтувати [36].

У розглянутій мережі канали утворюються за допомогою модуляції інформаційними сигналами піднесуть частот, які перебувають в радіочастотному (РЧ) діапазоні. Таким чином можна сформувати канали з різними форматами модуляції і швидкостями передачі. Отже, застосовуючи частотне рознесення каналів, використовуючи добре розроблену високочастотну техніку, можна сформувати груповий електричний сигнал,

відповідний мультигігагерцовій смузі частот. Для передачі по оптичного волокна такий груповий сигнал «переноситься» в оптичний діапазон за допомогою оптичного модулятора (ОМ). Перевагою такої мережі, перед мережами з тимчасовим поділом каналів, є те, що підносійні канали незалежні один від одного і не потребують синхронізації.

У запропонованій системі кожен ВК з'єднується з іншими ВК за допомогою переприйому підносійних каналів на проміжних ВК. Оскільки кожен ВК має повідомлення, адресоване іншим $(N-1)$ ВК, то в кожному ВК підносійні частоти (канали) вибираються таким чином, що, роблячи багаторазові стрибки через інші ВК, вони досягають точки призначення. Розглянемо алгоритм вибору підносійних частот, при якому реалізація переприйому через проміжні ВК спрощується.

Для аналізу системи скористаємося визначенням структурної матриці мережі і деякими операціями над нею. У нашому випадку, структурної матрицею M мережі з N вузлами будемо називати квадратну матрицю порядку N , в якій кожному вузлу i відповідає i -й рядок j -й стовпець:

$$M = \| f_{ij} \| . \quad (3.1)$$

Тут $i, j = 1, 2, \dots, N$. Вхідження f_{ij} визначаються за наступним правилом:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ при } i = j; \\ f_{ij}, \text{ якщо } \epsilon \text{ підносійний канал від вузла } i \text{ до вузла } j; \\ 0, \text{ якщо такого каналу не має.} \end{cases} \quad (3.2)$$

Для кільцевої мережі, зображеної на рис. 3.2, структурна матриця має вигляд:

$$M = \left\| \begin{array}{cccccccc} 1 & f_{1,2} & f_{1,3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & f_{1,N} \\ f_{2,1} & 1 & f_{2,3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & f_{2,N} \\ f_{3,1} & f_{3,2} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & f_{3,N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{N,1} & f_{N,2} & f_{N,3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{array} \right\| \quad (3.3)$$

Отримана структурна матриця визначає ті власні підносійні частоти вузлів, які в подальшому будуть модульовані інформаційними даними, формуючи, таким чином, власні підносійні канали вузлів.

Відзначимо, що в системі існує $N(N - 1)$ підносійних каналів, і частотний діапазон розділений на N піддіапазонів (стовпці матриці M), в кожному з яких знаходяться $(N - 1)$ підносійних каналів. На рис. 3.4 показані піддіапазони і частотний розподіл в них.

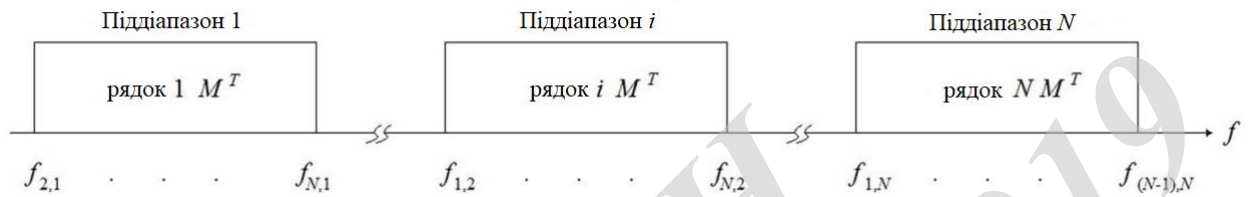


Рисунок 3.4 - Частотний розподіл піднесуть каналів

Дані підносійні канали після поширення через оптичне волокно повинні прийматися відповідними вузлами. Для цього скористаємося транспонованою матрицею M^T порядку N , в якій кожному вузлу i відповідає j -й рядок i -й стовпець:

$$M^T = \| \| f_{ij} \| \| . \quad (3.4)$$

Тут $i, j = 1, 2 \dots N$. Вхідження f_{ji} визначаються за наступним правилом:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ при } i = j; \\ f_{ij}, \text{ якщо } \in \text{ підносійний канал від вузла } j \text{ до вузла } i; \\ 0, \text{ якщо такого каналу не має.} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$M^T = \left\| \begin{array}{cccccccc} 1 & f_{2,1} & f_{3,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & f_{N,1} \\ f_{1,2} & 1 & f_{3,2} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & f_{N,2} \\ f_{1,3} & f_{2,3} & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & f_{N,3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{1,N} & f_{2,N} & f_{3,N} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{array} \right\| \quad (3.6)$$

Рядки матриці M^T відповідають тим піднесучим каналам, які приймаються вузлами. Так, наприклад, ВК i приймає підносійні канали, що знаходяться на рядку i матриці M^T . Отже, треба так вибрати смугу пропускання електричних фільтрів вузла i , щоб в неї входили тільки вищевказані на рядку i підносійні канали. Ці канали розташовані в одному піддіапазоні, тому технічна реалізація такого приймача не представляє особливих труднощів.

Що стосується переприйому підносійних каналів, то він реалізується автоматично за допомогою спеціального вибору елементів матриці M і схемного рішення приймачів і передавачів вузлів. Приклад структурної схеми вузла i показаний на рис. 3.5.

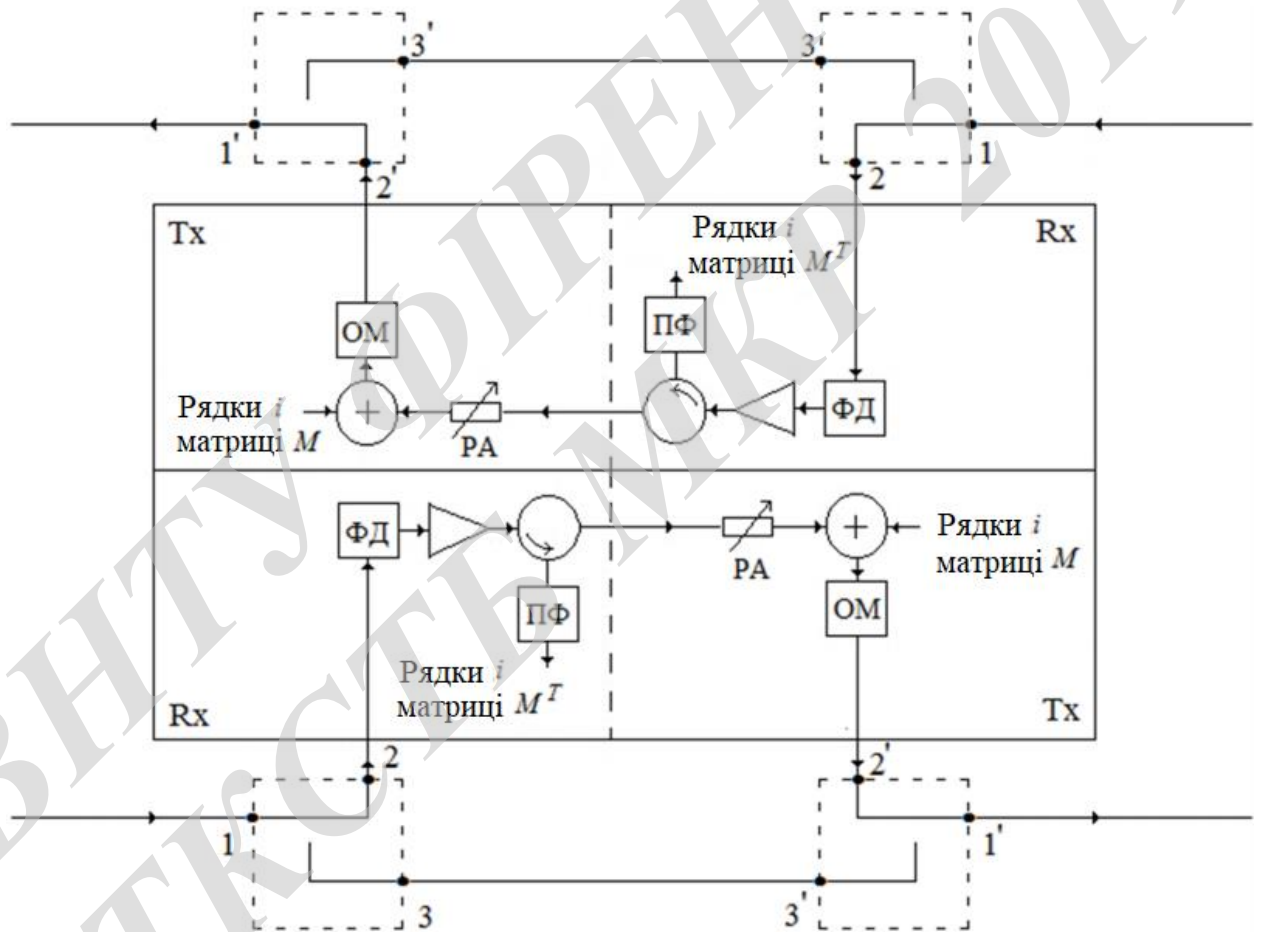


Рисунок 3.5 - Структурна схема ВК i

Як видно з рис. 3.5 кожен ВК поглинає (при нормальному функціонуванні вузла) оптичну хвилю від сусіднього вузла, детектує за допомогою фотодетектора (ФД) і підсилює підносійні канали. КК приймає адресовані йому підносійні канали (рядок i матриці M^T , $i = 1, 2, \dots, N$ - відповідає номеру приймального вузла) за допомогою смугового фільтра

(СФ) і переправляє інші підносійні канали за допомогою циркулятора і регульованого аттенюатора (РА) сусіднім вузлам, після того, як підсумує їх з власними підносійними каналами (рядок i матриці M , $i = 1, 2, \dots, N$ - відповідає номеру передавального вузла), призначеними для інших $(N - 1)$ вузлів. Сформований на виході суматора сигнал перетвориться в оптичний за допомогою оптичного модулятора (ОМ) і отриманий оптичний сигнал передається до сусідніх ВК.

Таким чином, підносійні канали приймаються, і якщо в цьому є необхідність передаються на наступний вузол/вузли поки не досягнуть адресата. Як видно, це переприймання підносійних каналів виконується за допомогою одних і тих же передавачів і приймачів вузла, і немає необхідності використовувати додаткові повторювачі, перетворювачі частоти, підсилювачі або швидкоперестроювані компоненти, а також координаційні протоколи. Ще однією перевагою даної системи є можливість кожного вузла контролювати якість передачі за допомогою порівняння на прийомі даних, отриманих за обома напрямками волоконного кільця.

Відмовостійкість при пошкодженні цілісності оптичного кабелю зводиться до наступного. Якщо в якомусь місці пошкоджено волокно, то, наступні за цим місцем приймачі вузлів реєструють втрату оптичної потужності і переключаються на прийом з іншого волокна (тобто з іншого напрямку), де оптична потужність максимальна. У таких системах відмовостійкість збільшується також завдяки фізичній підключенню вузлів до волоконному кільцю за допомогою ОК, тобто вихід з ладу вузла або групи вузлів не впливає на якість зв'язку інших вузлів, тому що ОК можуть ізолювати вийшов з ладу вузол.

Збільшення обслуговується навантаження будь-якого вузла неможливо без збільшення кількості існуючих підносійних каналів, тому при практичній реалізації мережі з такою кільцевою топологією необхідно резервувати підносійні канали. Залежність кількості підносійних каналів від кількості вузлів показано на рис. 3.6.

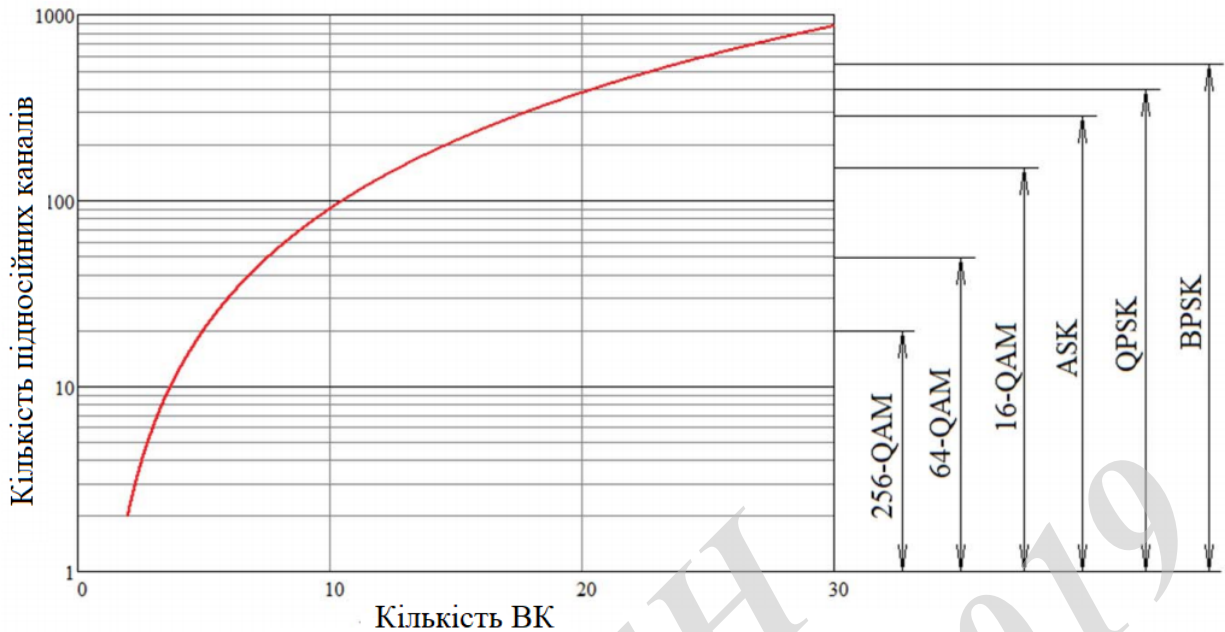


Рисунок 3.6 - Залежність кількості підносійних каналів від кількості вузлів

На рис. 3.6 з правого боку представлено оціночна кількість тих, що піднесуть каналів з різним форматом модуляції BPSK, QPSK, ASK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM. Ці оцінки засновані на обмеженні кількості піднесуть через нелінійних явищ, що виникають в оптичному тракті. Основним обмежуючим фактором кількості піднесуть форматів модуляції BPSK, QPSK, ASK є чотирьох хвильове зміщення. Основним обмежуючим фактором кількості піднесуть форматів модуляції 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM є фазова крос-модуляція. Як видно з рис. 3.6 кількість КК залежить від формату модуляції в підносійних. Розмістивши в кільці 20 ВК можна використовувати 400 підносійних каналів з форматом модуляції QPSK. При використанні ~ 150 підносійних каналів з форматами модуляції 16-QAM можна в кільці розмістити 12 КК. Використання форматів модуляції 64-QAM і 256-QAM в такий кільцевої мережі можливо при декількох (близько 5-7) ВК. Зауважимо, що вищевказані оцінки справедливі в припущенні, що ОМ модулюється багатоканальним сигналом, що складається з каналів однотипного формату модуляції без застосування коригуючого кодування сигналів FEC. При використанні FEC різко збільшиться кількість тих, що піднесуть каналів, відповідно і число ВК. Так як в кільці використовується одна довжина хвилі, то в подальшому можливе поетапне збільшення пропускної здатності мережі за допомогою технології DWDM. При цьому необхідно передбачити для кожного ВК одночасну передачу і прийом на різних довжинах хвиль за існуючим кільцевому волоконно-оптичному

тракту. У цьому випадку зміни торкнуться тільки обладнання, що знаходиться в ВК.

3.3 Волоконно-оптична кільцева опорна мережа з комутацією підносійних каналів

У розглянутій кільцевій топології мережі присутній центральна станція (ЦС), яка порушує безперервність волоконного кільця (рис. 3.7). В системі, крім ЦС, є N пасивно підключених вузлів комутації (ВК). Все ВК мають фізичний доступ до оптичного волокна через пасивні оптичні мультиплексори вводу-виводу (OADM - optical add-drop multiplexer), налаштовані на певні хвилі.

Наприклад, ВК i передає на ЦС інформацію на хвилі λ_i і повністю поглинає інформацію, передану від ЦС на хвилі λ_i . У мережі використовується принцип з'єднання «кожен ВК з кожним» за допомогою комутації підносійних каналів. Тут підносійні канали освічені з допомогою модуляції інформаційними сигналами підносійних частот. Комутація каналів відбувається на ЦС. Оскільки кожен ВК має повідомлення, адресоване іншим ($N - 1$) ВК, в тому числі ЦС, в кожному ВК відбувається групо утворення вихідних каналів таким чином, що під час передачі на хвилі λ_i ВК i буде передавати N піднесуть каналів. Один з них, номер якого збігається з номером ВК, призначається для ЦС, а решта ($N - 1$) - для інших ВК. Наприклад, на передачу від ВК i підносійний канал 1 - перша підносійна частота f_1 , модульованная даними, призначеними для ВК 1, що піднесуть канал 2 сусідня підносійна частота f_2 , модулювання даними, призначеними для ВК 2, і т.д., а підносійний канал i - підносійна частота, моделювання даними ВК i і призначена для ЦС.

Передана одним ВК оптична хвиля вводиться в волокно через OADM і рухається проти годинникової стрілки (ПГС) разом з іншими хвилями, переданими ЦС іншими ВК. Таким чином, в волокні будуть існувати N оптичних носійних, кожна з яких в свою чергу «несе» N підносійних каналів.

На вході ЦС варто оптичний демультиплексор (DMUX), за допомогою якого кожна оптична хвиля відділяється і детектується в окремому фотодетектори ФД $_i$, де $i = 1, 2, \dots N$. На виходах фотодіодів (в ідеальному випадку - при передачі без спотворень) отримуємо спектри, ідентичні спектрами модулюють сигналів (рис. 3.8). Залишається тільки скомутувати підносійні канали, призначені певних вузлів. Уявімо групу входять підносійні канали, що йдуть від різних ФД (тобто від різних ВК), як «вхідна»

матриця. Тоді під терміном «комутація підносійних каналів» будемо розуміти перестановку стовпців «вхідної» матриці на відповідні рядки «вихідної» матриці, що символічно можна представити як (рис. 3.8):

$$(m, n)_{\text{вх}} \xrightarrow{n \neq m} (m, n)_{\text{вих}}, \quad m, n = 1, 2, \dots, i, \dots, N, \quad (3.7)$$

де перший символ (номер рядка) визначає номер вузла, куди/звідки передаються підносійні канали, а другий символ (номер стовпчика) - номер підносійної частоти, тобто номер каналу.

Діагональні елементи «вхідної» матриці, відповідні $m = n$, що не комутуються, а приймаються ЦС, так як в них міститься інформація, передана ЦС від всіх існуючих в системі вузлів. А власна інформація ЦС, адресована всім вузлам, передається на діагональних ($m = n$) елементах «вихідної» матриці.

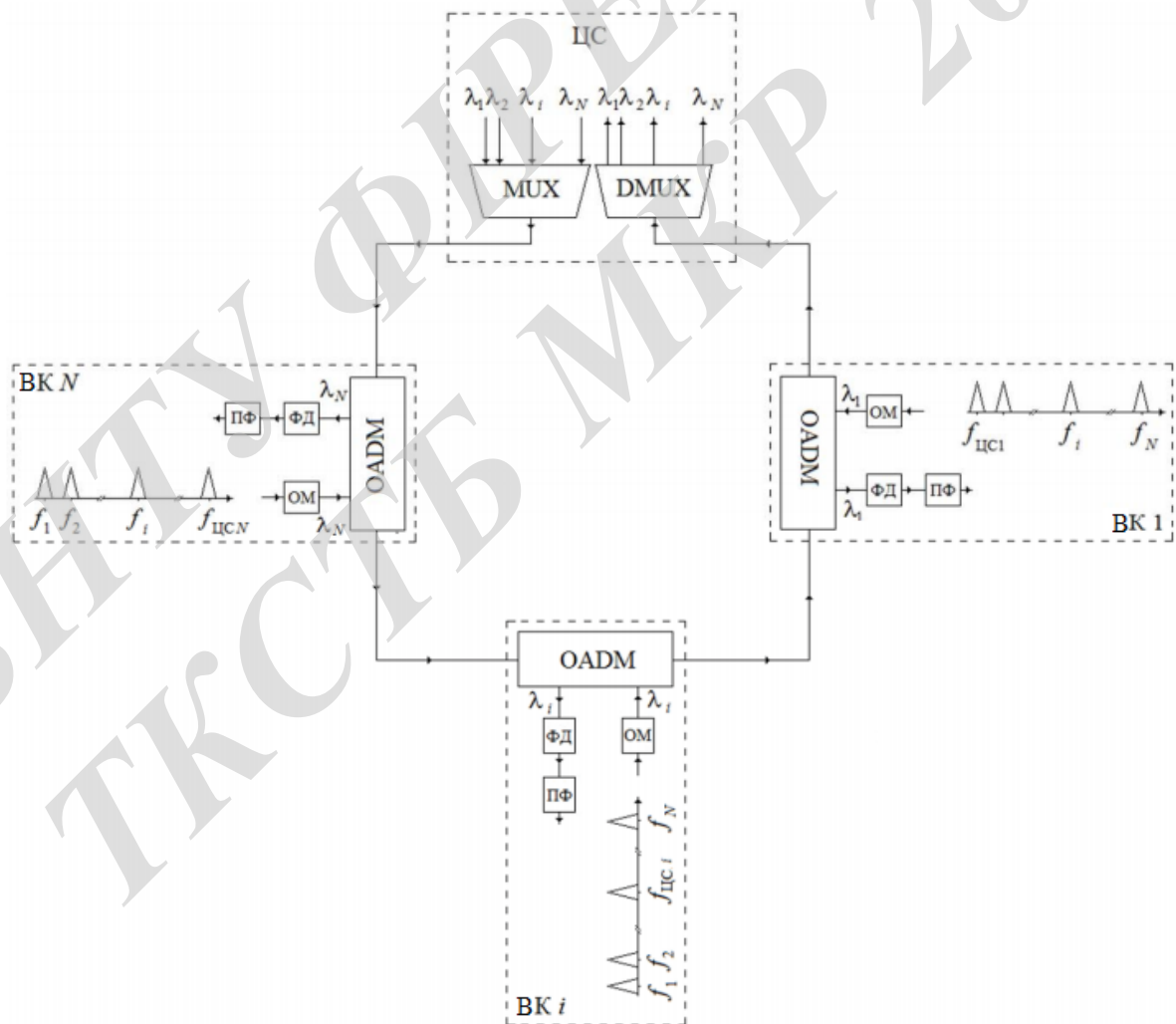


Рисунок 3.7 - Структурна схема одноволоконної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів

Рядки «вихідної» матриці (тобто вихідні сигнали комутатора ЦС) надходять на оптичні модулятори (ОМ) працюють на певних довжинах хвиль λ_i ($i = 1, 2, \dots, N$), номери яких відповідають номерам ВК, які приймають ці хвилі. Після мультиплексування за допомогою MUX ці оптичні несучі поширюються через оптичне волокно проти годинникової стрілки; кожен КК налаштований тільки на одну певну хвилю, тому він приймає тільки ту інформацію, яка адресована йому, не впливаючи на поширення інших хвиль.

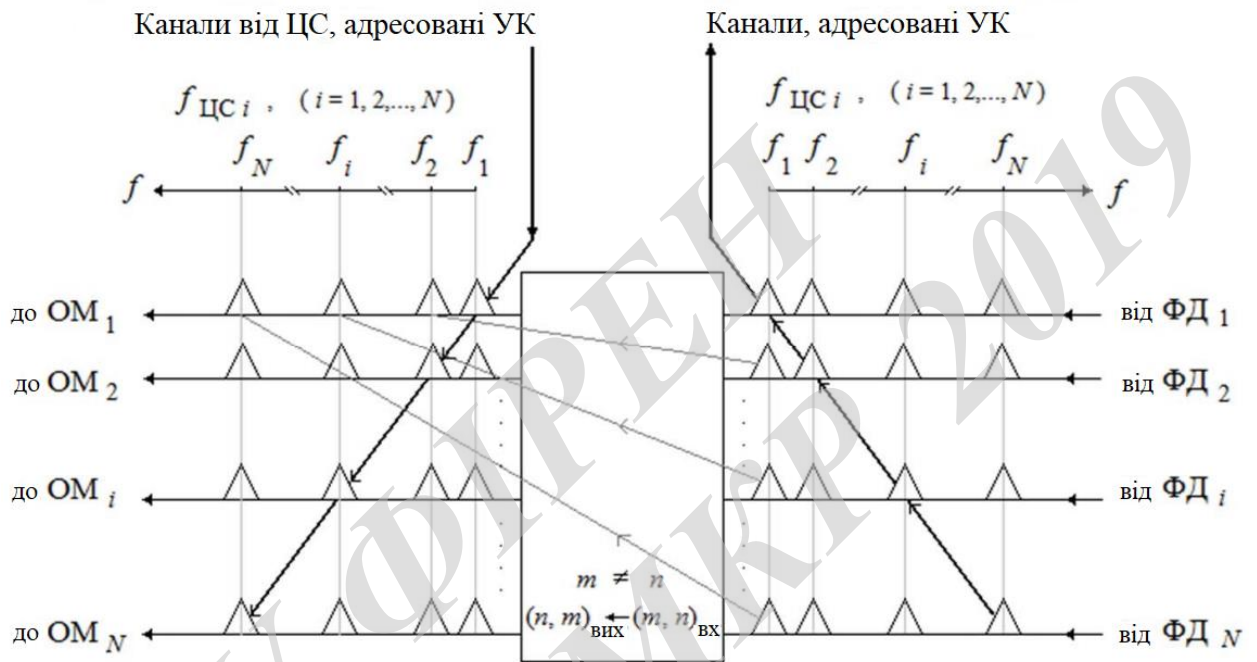


Рисунок 3.8 - Структурна схема комутації підносійних каналів

Всі електронні елементи ВК ідентичні і налаштовані на одні і ті ж підносійні частоти ($f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_N$), що здешевлює систему.

Приклад побудови ЦС показаний на рис. 3.9.

Відразу після демультимплексування оптичних носійних і фотодетектування, за допомогою циркуляторів (Ц) і смугових фільтрів (СФ), які налаштовані на частоти $f_{ЦС i}$ ($i = 1, 2, \dots, N$), вилучається інформація, адресована ЦС, а решта підносійних канали передаються перетворювачів частот (ПЧ), де відбувається перетворення, тобто зсув цих підносійних по частоті.

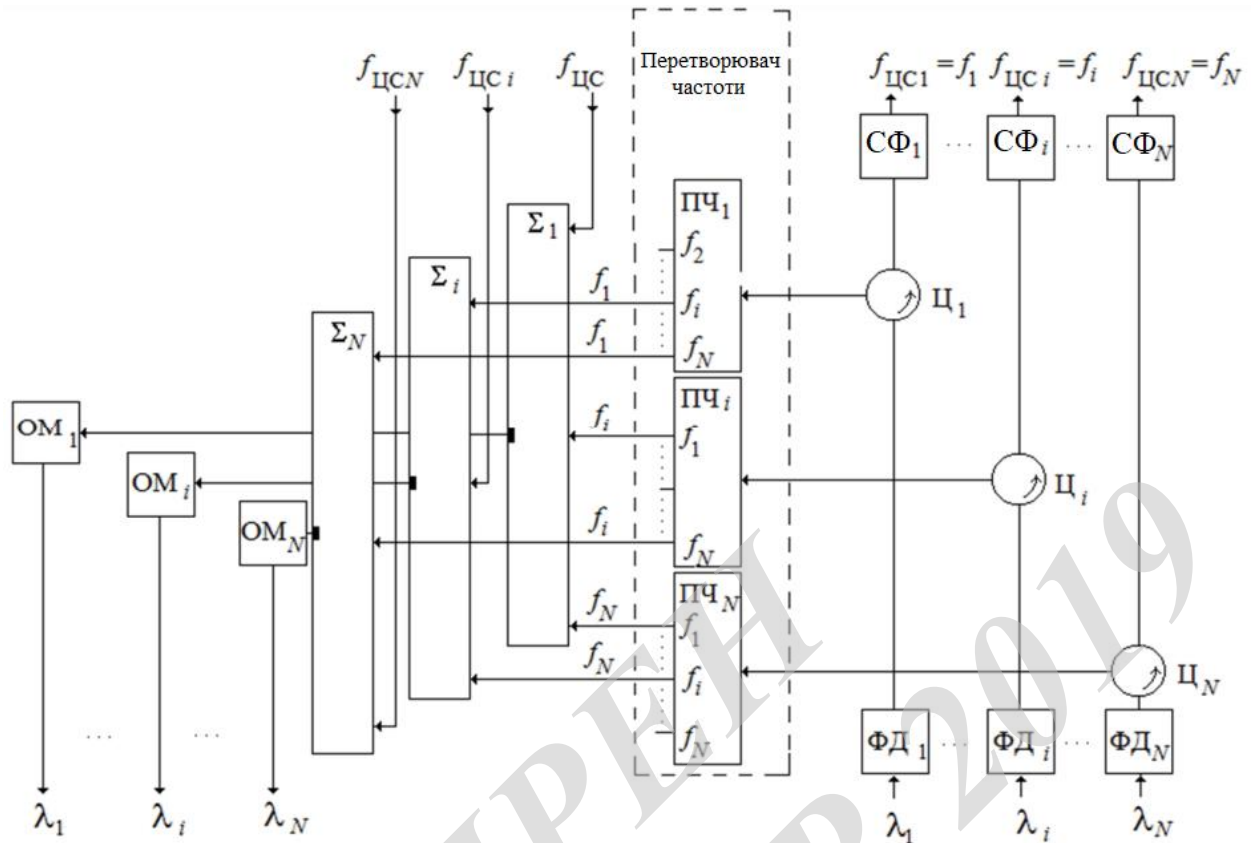


Рисунок 3.9 - Структурна схема центральної станції (ЦС)

Наприклад, в $ПЧ_1$ всі вхідні підносійні ($f_2, f_3, \dots, f_i, \dots, f_N$) відповідно зсуваються по частоті так, щоб їхні центральні частоти збігалися з частотою f_1 . У $ПЧ_2$ всі вхідні підносійні ($f_1, f_3, \dots, f_i, \dots, f_N$) відповідно зсуваються по частоті так, щоб їхні центральні частоти збіглися з частотою f_2 , і т.д. Іншими словами, на виходах кожного $ПЧ_i$ маємо $(N-1)$ підносійних каналів на частоті f_i , кожна з яких з'єднується з суматорами Σ_i таким чином, щоб в Σ_1 підсумовувалися підносійні канали, адресовані ВК 1, а в Σ_2 підносійні, адресовані ВК 2, і т.д. Але, так як ЦС також повинна передавати свою власну інформацію до всіх вузлів, на входи суматорів подаються також підносійні канали ЦС $f_{ЦС_i}$, адресовані відповідно всім ВК. Відзначимо, що додавання цих підносійних каналів призводить до повного відновлення форми спектра «вихідної» матриці (рис. 3.8), тобто на виходах кожного суматора (рядки «вихідної» матриці) маємо N підносійних каналів, але вже скомутованих. Наприклад, в спектрі вихідного сигналу Σ_1 підносійний канал з номером 1 представляє підносійну частоту f_1 , модульовану даними ЦС, адресовану ВК 1, що підносійний канал з номером 2 - частоту f_2 , модульовану даними ВК 2 і адресовану ВК 1, і т.д.; Підносійний канал з номером i - підносійна частота моделювання даними ВК i і адресована ВК 1.

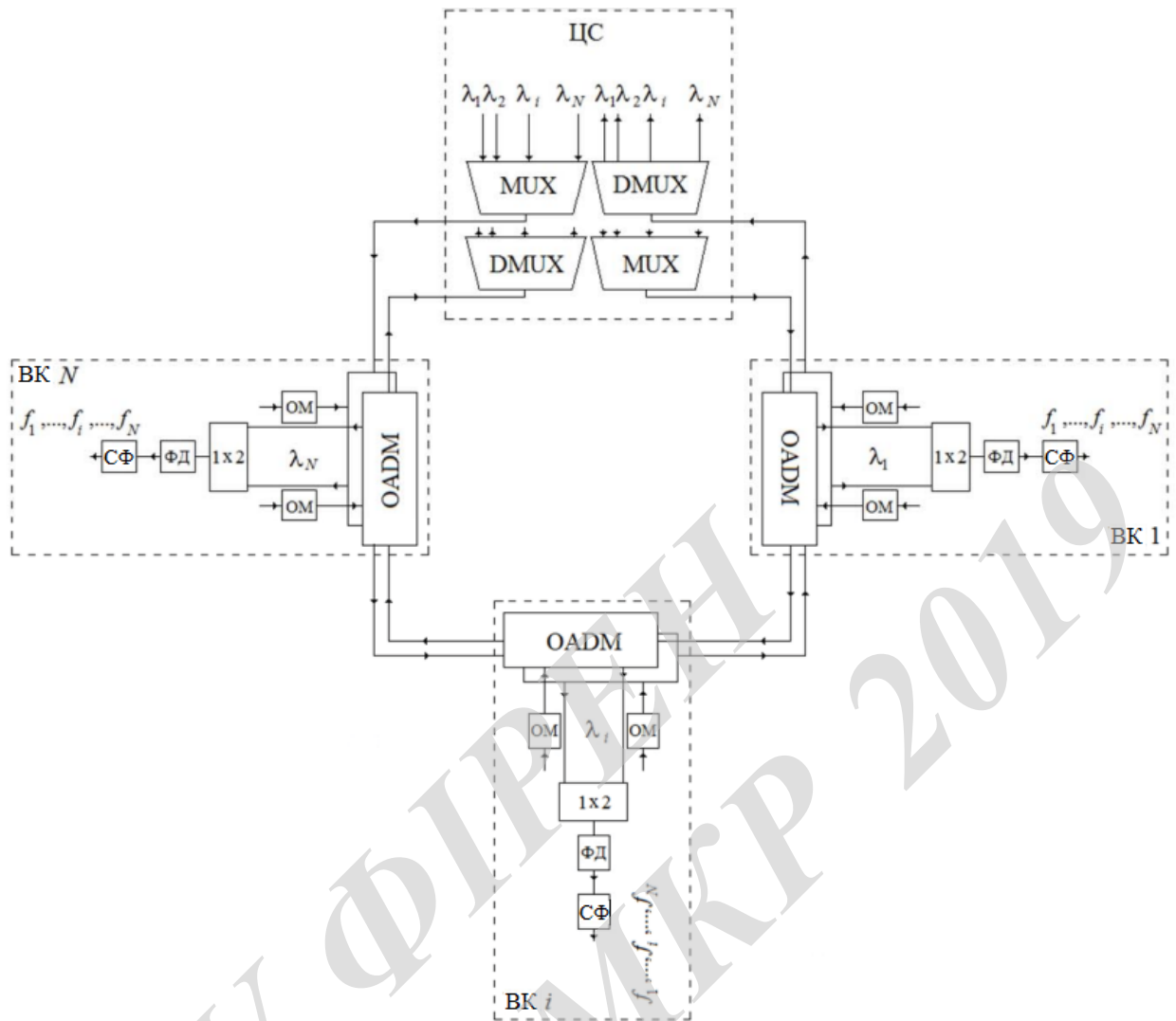


Рисунок 3.10 - Структурна схема високонадійної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів

Такі одноволоконні системи передачі недостатньо надійні. Для підвищення надійності і виживання використовуються два волокна (рис. 3.10). Тепер, коли вузли передають і приймають інформацію і за годинниковою і проти годинникової стрілки, система стає надійною і самовідновлювальною. Наприклад, якщо в якомусь місці пошкоджено волокно, то, наступні за цим місцем приймачі вузлів, реєструють втрату оптичної потужності і за допомогою оптичного комутатора (1×2) перемикаються на прийом з іншого волокна (тобто з іншого напрямку), де оптична потужність на відповідній хвилі максимальна. У таких системах надійність збільшується ще завдяки пасивному підключенню вузлів до волокна, тобто вихід з ладу вузла або групи вузлів впливає на якість зв'язку інших вузлів.

3.4 Волоконно-оптична кільцева опорна мережа з комутацією піднесуць каналів за запитами

Пропонована на розгляд кільцева мережа, є логічним продовженням мережі, розглянутої в п.3.3. Нові послуги та служби, а також збільшення кількості користувачів в майбутньому, можна реалізувати легко, без руйнування існуючої інфраструктури мережі, так як інформаційні дані, які несуть різні підносійні, незалежні один від одного, не потребують синхронізації, можуть передаватися з різною швидкістю і різними форматами.

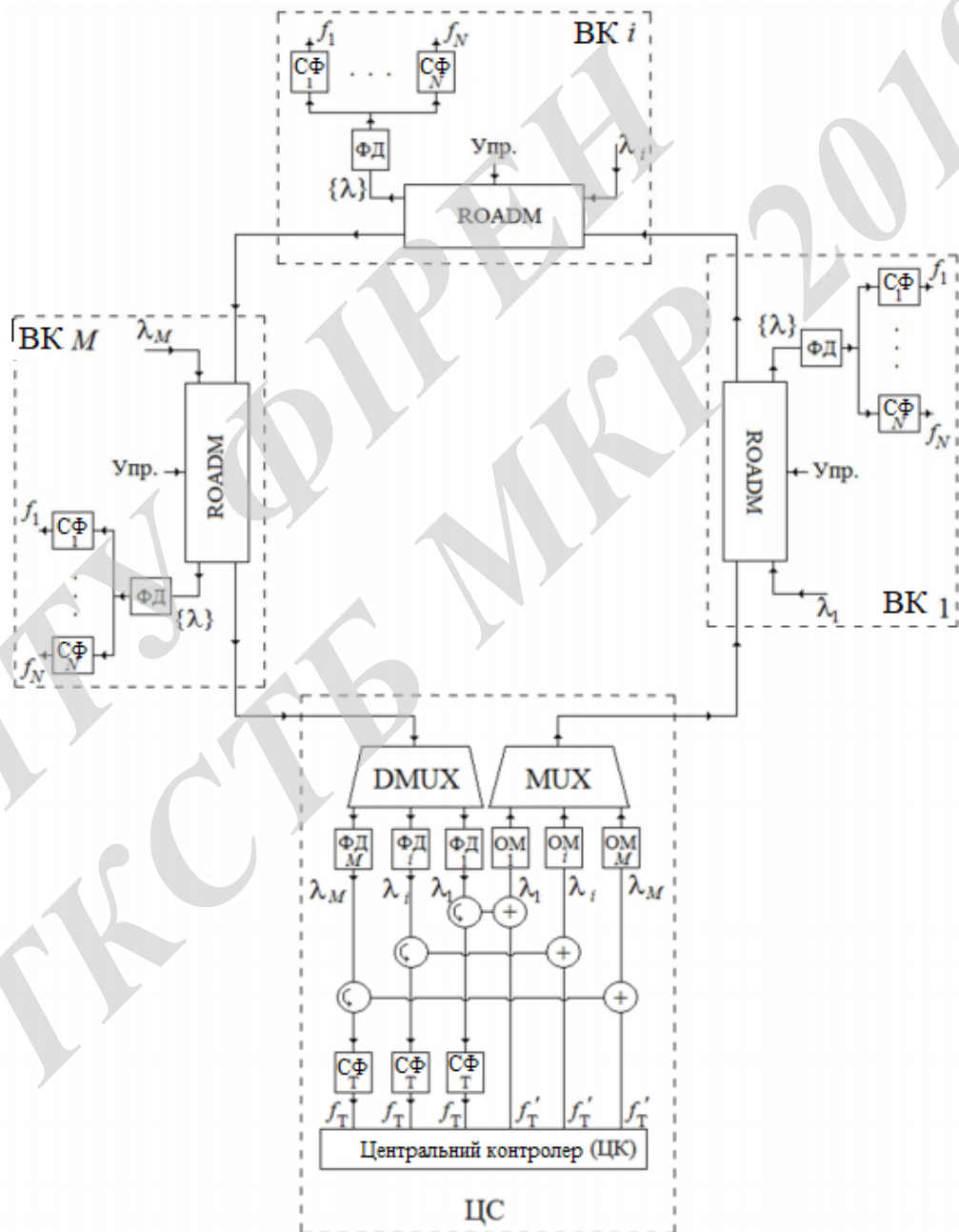


Рисунок 3.11 - Структурна схема кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів за запитами

Структурна схема кільцевої мережі комутації показана на рис. 3.11. Система складається з ЦС, яка порушує безперервність волоконного кільця включенням мультиплексора/демультиплексора оптичних носійних і підключених до волокна M ВК за допомогою перебудовуються оптичних мультиплексорів вводу/виводу (ROADM - reconfigurable optical add / drop multiplexer).

Кожен ВК мережі працює на своїй певній довжині хвилі. Кожна оптична хвиля може містити багато каналів на різних піднесуть частотах, де кожен підносійна канал може передати, в свою чергу, різноманітні сервісні сигнали. Отже, будь-який ВК в мережі може передавати багато-інформаційні потоки різних вузлів, використовуючи один оптичний передавач на певній довжині хвилі.

Приймачі ВК знаходяться під контролем ЦС і мають можливість, згідно керуючим командам, що йде від ЦС, вибрати з потоку, що входять у вузол оптичних хвиль, довільну комбінацію, більш того, навіть не знаходяться по сусідству хвиль одна з одною. Ця селекція здійснюється легко, за допомогою ROADM. Вибрані хвилі без подальшого розщільнення детектуються одним оптичним детектором і, за допомогою електронних смугових фільтрів, вибираються необхідні підносійні канали, призначені вузлу.

З цієї точки зору, спільне застосування мультиплексування оптичних носійних і мультиплексування підносійних каналів дають можливість ВК одночасно передавати і одночасно приймати різноманітні інформаційні потоки від інших вузлів.

ЦС складається з центрального контролера (ЦК), який стежить за станом вузлів. При надходженні нової вимоги на встановлення з'єднання, ЦК забезпечує перебудову оптичних приймачів вузлів, в результаті чого відбувається комутація несучих між необхідними ВК. Наприклад, ЦС може встановлювати з'єднання як між двома ВК, так і між одним вузлом і багатьма ВК (в разі забезпечення служб мовлення - односторонній трафік).

На рис. 3.12 показана структурна схема вузла i . Оптичні підсилювачі (ОУ) призначені забезпечити потрібне посилення для ефективного функціонування приймачів вузла і для компенсації загасання в системі. Показання на рис. 3.12 перебудовувані оптичні мультиплексори введення/виведення ідентичні. Мультиплексор ROADM 1 вузла i призначений для прийому контрольних сигналів (λ_i ; f_T), що йдуть від ЦС з наступною передачею і T їх до місцевого контролера (МК), а також, для введення в волокно на хвилі λ_i контрольних сигналів для ЦС (стан

підносійних каналів на прийомі, відповідь на запит і т. д.). Інформація для інших ВК і контрольні сигнали перетворюються в підносійні канали в формувачі підносійних каналів, і отриманий груповий багатоканальний сигнал потрапляє на вхід оптичного модулятора (ОМ), далі оптичний сигнал на довжині хвилі λ_i вводиться в волокно. Залишки інформаційних підносійних, передані ВК i на хвилі λ_i і зробили один повний цикл по кільцю, поглинаються на прийомі узгоджувачем навантаженням (УН) (рис. 3.12).

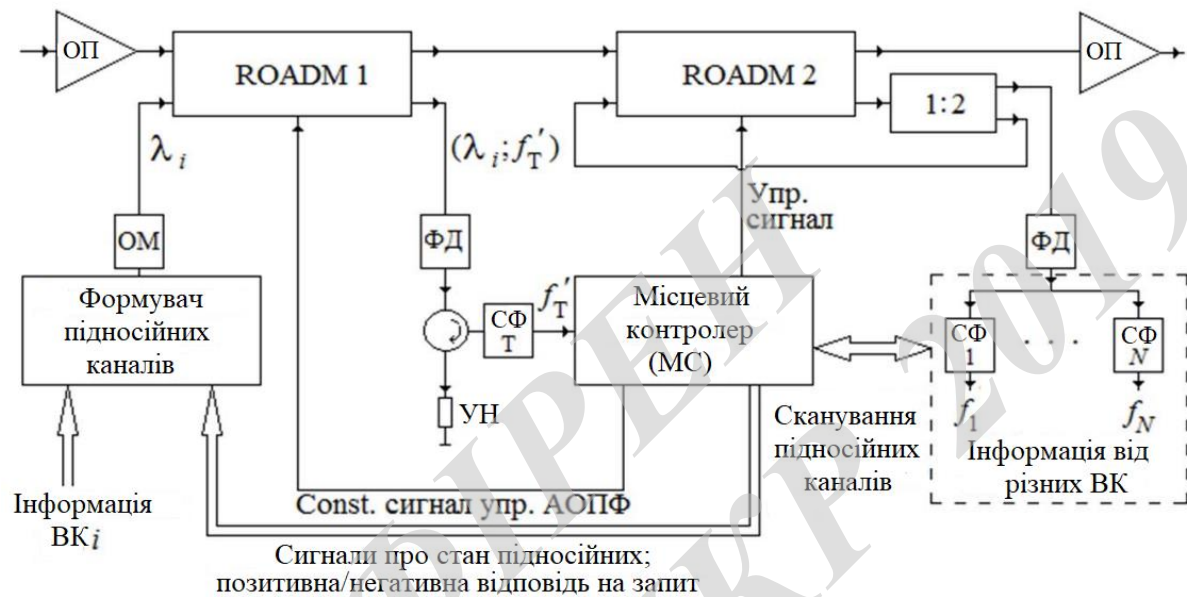


Рисунок 3.12 - Структурна схема ВК i

Мультиплексор ROADM 2 ВК i призначений для прийому інформації, що надходить від різних вузлів на різних оптичних хвилях, і має можливість вибору з цього потоку довільній комбінації оптичних хвиль відповідно до сигналів управління від МК. Обрана ROADM 2 група хвиль згодом розщеплюється в відгалужувачів (1:2). Одна гілка (1:2) загортається на інший вхід ROADM 2, в результаті чого на виході ВК i в волоконному кільці відновлюється весь спектр переданих оптичних хвиль, які несуть інформацію також для інших ВК. А з другої розщепленої гілки (1:2) після фотодетектування ВК i приймає йому адресовані підносійні за допомогою смужових фільтрів (СФ).

Передані кожним ВК оптичні хвилі, поширюючись по волоконному кільцю, потрапляють на вхід ЦК, де за допомогою DMUX поділяються.

Після фотодетектування, ЦК вибирає (за допомогою СФ) підносійні f_T , які містять контрольні сигнали з вимогами вузлів, а решта підносійних, призначені іншим вузлам, за допомогою циркуляторів, передаються суматору, де підсумовуються з підносійними f_T , що містять контрольні

сигнали від ЦК, призначені для перебудови відповідних ROADM 2 вузлів. Після оптичної модуляції, оптичні хвилі вводяться в волокно за допомогою MUX і поширюються по кільцю.

Для більш ясного розуміння роботи системи, проілюструємо черговість контрольних сигналів при встановленні з'єднання між вузлом j і вузлом i , яка показана на рис. 3.13.

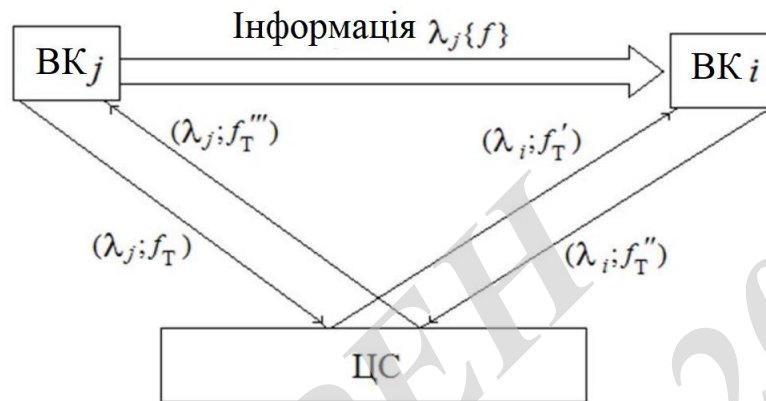


Рисунок 3.13 - Контрольні сигнали для встановлення зв'язку вузла j з вузлом i

1) ВК j передає ЦС запит на встановлення з'єднання з вузлом i . Цей запит реалізований на піднесі f_T на хвилі λ_j , який позначимо $(\lambda_j; f_T)$.

2) Після обробки цієї вимоги ЦС передає на $(\lambda_i; f'_T)$ контрольний і T сигнал для перебудови ROADM 2 ВК i . Цей сигнал приймається ROADM 1 ВК i і після детектування і фільтрації підносійної f'_T передається до МК (рис. 3.12). Відзначимо, що ROADM 1 ВК i постійно налаштований на прийом хвилі λ_i , отже, рециркуляція даної хвилі по кільцю неможлива. Місцевий контролер ВК i перебудовує ROADM 2 на прийом хвилі λ_j . Якщо, по крайній мірі, одна з підносійних вільна, то МК ВК i передає ЦК позитивну відповідь на вимогу $(\lambda_i; f''_T)$ за допомогою формувача підносійних із зазначенням частоти вільної підносійної. У свою чергу, ЦС передає сигнал дозволу на $(\lambda_j; f'''_T)$ ВК j , в іншому випадку, запит на з'єднання відхиляється, з'являється блокування в системі, ВК j приймає сигнал зайнятості від ЦС на $(\lambda_j; f'''_T)$.

Відзначимо, що всі контрольні сигнали, знаходяться в частотній області на одній частоті, і тільки для простоти аналізу вони позначені штрихами.

3) Після перебудови ROADM 2 ВК i на прийом оптичної хвилі λ_j , з'єднання вважається сталим. ВК j може передавати ВК i інформацію без подальшого втручання з боку ЦК.

Порівняємо дану мережу з мережею, розглянутої в п.3.3, де збільшення обслуговується навантаження будь-якого ВК неможливо без збільшення кількості існуючих підносійних, що може стати важко реалізовується завданням в діючих мережах. Розглянута тут мережа з комутацією підносійних за запитами дозволяє при збільшенні навантаження в ВК, обслужити весь трафік, але з певною ймовірністю блокування. Розрахунок ймовірності блокування заявки в мережі з вказаною вище процедурою обміну контрольними сигналами представлений в [25]. Так, наприклад, розрахунки [25] показують, що при збільшенні навантаження в ВК на 50% при кількості піднесуть $N > 50$, верхня межа ймовірності блокування збільшується з 10^{-22} до 10^{-14} , що може бути цілком допустимим за певних вимог до мережі. Також відзначимо, що чим більша кількість підносійних каналів, тим менше ймовірність блокування заявки.

Недоліком таких одноволоконних мереж є невисока надійність. Для підвищення надійності та виживання мережі при обривах волокна і/або при виході з ладу самої ЦС при двоволоконній кільцевій топології рекомендується резервувати ЦС і розташовувати кільця в іншому місці.

Таким чином, гнучкість мережі дозволяє використовувати комутацію каналів з довільним форматом сигналів. Дворазова фільтрація забезпечує певний рівень надійності як ЦС, так і вузлів. Оскільки фільтрація оптичних хвиль виконується під керівництвом ЦС, то остання може відмовити в доступі ВК, яка не має повноважень. Фільтрація підносійних каналів на місцях дозволяє ВК приймати безліч сервісних послуг одночасно.

3.5 PON-мережі з частотним розділення каналів

У цьому параграфі розглядається узагальнена схема PON мережі з частотним розділення каналів (FDM - frequency division multiplexing). Так як частотне розділення каналів відбувається і оптичному і в радіочастотному (РЧ) діапазонах, то позначимо такі мережі як FDM-PON. Відомо, що витрати на оптичну інфраструктуру значні і довгострокові, отже при проектуванні і впровадженні FDM-PON-мереж необхідно прагнути не зачіпати існуючу оптичну інфраструктуру. Можливі незначні зміни в структурі традиційних PON-мереж. Так, наприклад, при реконструкції волоконно-оптичної інфраструктури існуючої PON мережі в місці розгалуження мережі необхідно помістити оптичний мультиплексор/демультиплексор (MUX/DMUX). Можливе використання існуючих пасивних розгалужувачів (оптичних спліттерів) оптичних сигналів 1:N, рівномірно ділять вхідні оптичну

потужність між N кінцевими пристроями ONU. Дана зміна в мережі дозволяє за допомогою технології щільного мультиплексування по довжинах хвиль (DWDM) і заміни активного обладнання збільшити пропускну здатність мережі і забезпечити користувачів послуг гарантованим широкосмуговим дуплексним зв'язком.

Застосування частотного поділу каналів дозволяє поетапно збільшувати пропускну здатність мережі, у міру необхідності. До передачі по оптичному волокну в діапазонах РЧ формуються групові сигнали з підносійними каналами, які «переносяться» в оптичний діапазон за допомогою модуляції оптичної носійної. Відзначимо, що підносійні канали можуть формуватися різними методами цифрової модуляції: BPSK, ASK, QPSK, QAM. Далі, групові багатоканальні сигнали з різними оптичними носійними мультиплекуються і вводяться в волокно. Зауважимо, що частотний інтервал між оптичними носійними регламентується ІТУ-Т [59].

Структурна схема FDM-PON-мережі показана на рис. 3.14. Як і в традиційних PON мережах, на центральній станції розташоване обладнання OLT, і за допомогою волоконно-оптичної розгалуженої мережі забезпечується зв'язок між кінцевими пристроями різної конфігурації. На рис. 3.14 умовно прийняті наступні позначення: ONU-100M, ONU-1G, ONU-10G - кінцевого пристрою, що забезпечують швидкості передачі 100 Мбіт/с, 1 Гбіт/с, 10 Гбіт/с, відповідно. На стороні центральної станції обладнання OLT складається з передавальних $Tx - m$ і прийомних $Rx - m$ оптичних модулів ($m = 1 \dots M$), MUX і DMUX, оптичних підсилювачів (ОУ) на передачу і попереднього підсилювача на прийомі, а також оптичного циркулятора [48]. Зауважимо, що в якості оптичного циркулятора можна використовувати двухпортовий спліттер.

Як видно з рис. 3.14 кожна пара $Tx - m$ і $Rx - m$ в обладнанні OLT передає і приймає на певній довжині хвилі λ_t , де $m = 1 \dots M$. Цим довжинах хвиль відповідають певні порти MUX / DMUX і певні спліттери оптичних сигналів 1:N, вихідні порти яких підключені до певних кінцевих пристроїв. Якщо за зменшення (DS) приймати напрямок від OLT до ONU, а за висхідний (US) - від ONU до OLT, то для організації двостороннього зв'язку можливі різні технічні рішення. Так, наприклад, для певного ONU можна зарезервувати дві довжини хвиль: λ_1 для DS-напрямки і λ_2 для US-напрямки. Таким чином, для організації дуплексного зв'язку з кінцевими пристроями число оптичних каналів в два рази перевищить число ONU. Часто мережі, що складаються з таких ділянок, називають WDM-PON-мережами, так як мультиплексування каналів відбувається тільки в оптичному діапазоні.

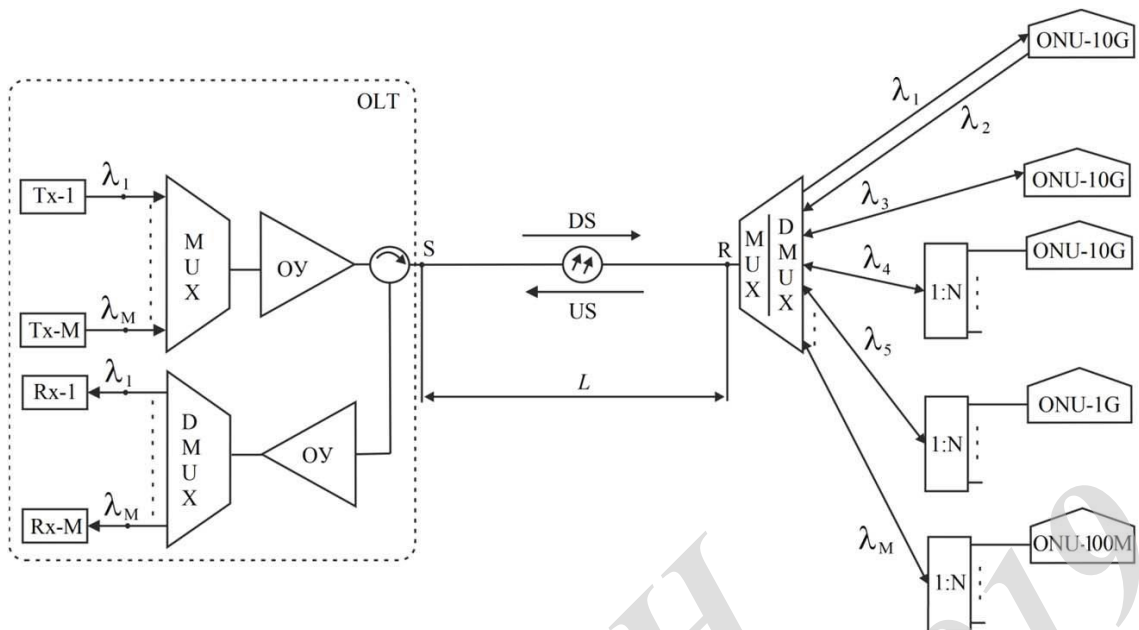


Рисунок 3.14 - Структурна схема FDM-PON-мережі

Обмежуючим фактором пропускної здатності WDM-PON-мереж є ЧВС, що виникає в оптичному волокні при завантаженні великої кількості каналів з досить великими рівнями потужності в каналах. WDM-PON-мережі можуть створюватися поверх структури традиційних PON мереж. В цьому випадку користувачеві надається досить широка виділена смуга, ізольована від смуг інших користувачів. Основний недолік WDM-PON-мереж - висока вартість, так як необхідно використовувати високоякісні оптоелектронні модулі, особливо в ONU. Необхідно відзначити, що в обладнанні ONU в оптичному модулі можна виключити джерело випромінювання. В цьому випадку опорний оптичний сигнал, наприклад на довжині хвилі λ_2 можна отримати від OLT, промодульований інформаційними сигналами даного ONU і відправити в US-напрямку.

Економічно і технічно вигідно в WDM-PON-мережах двосторонній зв'язок конкретного користувача організувати на одній довжині хвилі (скільки користувачів - стільки довжин хвиль). Більш того, відсутність джерел випромінювання в недорогому рішенні: ONU і генерування лінійки носійних оптичних частот на стороні OLT робить мережу «гнучкою», що дозволить в майбутньому поетапно збільшувати пропускну здатність мережі без капітальних витрат. Одним з таких способів організації зв'язку є використання в ONU відбивних напівпровідникових підсилювачів-ремодуляторів RSOA (reflective semiconductor optical amplifier) замість традиційних оптичних передавальних модулів [49]. На відміну від традиційного лінійного режиму роботи напівпровідникового підсилювача, RSOA функціонує в нелінійному режимі. Для стабільної роботи підсилювача

RSOA необхідний відносно потужний і практично рівномірний (без великих пауз) приплив зовнішньої енергії до його оптичному порту. У цьому випадку активна область підсилювача постійно знаходиться в режимі насичення. Перехід з насичення в лінійну область неприпустимий, оскільки параметри вихідного сигналу підсилювача стають нестабільними і містять сліди сигналу DS-напрямки. Таким чином, стає можливим вирізування сигналу DS-напрямки і ремодуляції оптичної несучої.

Існують два основних способи реалізації зв'язку на одній довжині хвилі з використанням RSOA. У першому випадку при передачі оптичних сигналів в US-напрямку використовуються оптимальні для подібних мереж лінійні коди за допомогою ремодуляції за допомогою RSOA. У зв'язку з необхідністю забезпечення на вході RSOA постійної оптичної потужності протягом тривалості бітового інтервалу $T = 1 / B$, де B швидкість передачі, використовуються коди з придушенням постійної складової в частотному спектрі електричного сигналу. Такими кодами можуть бути, наприклад, коди VI- L, M (Манчестерський) або 8B10B [13]. Зауважимо, що застосування цих кодів призводить до зменшення впливу на сигнали релеєвського розсіювання [46], що виникає при поширенні сигналів в двох напрямках, що збільшує стійкість мережі. На рис. 3.15 показаний типовий спектр в оптичному волокні на довжині хвилі, наприклад, λ_3 (відповідної оптичної носійної $f_{\text{опт}}$). Як бачимо з рис. 3.15, в низькочастотній області розміщується сигнал в US-напрямку, в високочастотній області - багатоканальний сигнал, що складається з безлічі підносійних, а також формально показана захисна смуга $\Delta f_{\text{зах}}$, що виникає при використанні кодів з придушенням постійної складової в спектрі сигналу для мінімізації впливу релеєвського розсіювання.

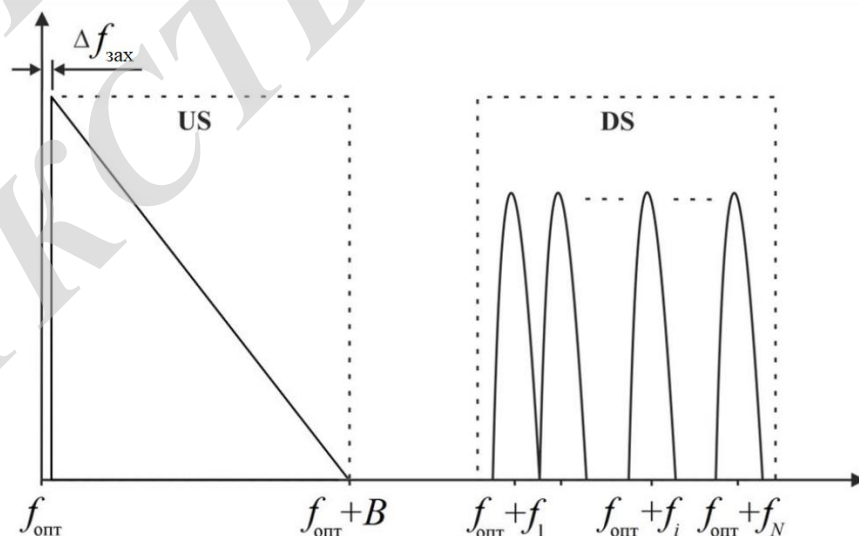


Рисунок 3.15 - Спектр сигналу в оптичному волокні на довжині хвилі λ_3

Даний спосіб передачі може використовуватися операторами бездротових систем зв'язку для «доставки» в DS-напрямку піднесуть каналів різних форматів модуляції без будь-яких перетворень каналів. Подібні системи передачі експериментально випробувані, сигнальні потоки зі швидкостями 10 Гбіт/с передавалися в двох напрямках на відстань 20 км.

Другий спосіб двостороння на одній довжині хвилі між OLT і ONU заснований на формуванні частотно-розділених підносійних каналів як в DS-напрямку, так і в US-напрямку. Розглянемо цей спосіб двостороння на прикладі передачі сигналів з довжиною хвилі λ_M (рис. 3.14). Для забезпечення кожного кінцевого пристрою гарантованою смугою пропускання на довжині хвилі λ_M організовані N дуплексних широкосмугових каналів. Для формування сигналів в DS-напрямку на $Tx - m$ застосовується односмугова модуляція оптичної носійної $f_{\text{опт}}$ (що відповідає довжині хвилі λ_M) багатоканальним сигналом, що складається з суми $(N + 1)$ піднесуть каналів на центральних частотах f_n , де $n = 1 \dots (N+1)$. Для формування сигналів в US-напрямку в кінцевих пристроях застосовується односмугова модуляція оптичної носійної $f_{\text{опт}}$ одноканальним сигналом на певній центральній частоті f'_n де індекс n відповідає конкретному ONU. Зауважимо, що для управління всіма ONU в мережі, а також для діагностики і віддаленого програмування ONU використовуються підносійні канали управління з центральними частотами: в DS-напрямку - $f_{\text{кер}}$, а в US-напрямку - $f'_{\text{кер}}$. Таким чином, максимальна кількість користувачів може досягати $M \cdot N$, де M - кількість довжин хвиль в мережі, а N - кількість підносійних каналів. В оптичному волокні спектр сигналу на довжині хвилі λ_T (відповідної оптичної несучої $f_{\text{опт}}$) має вигляд, показаний на рис. 3.16. Частотний інтервал між підносійними позначений Δf . Можливо розмежування DS- напрямки від US-напрямки захисною смугою $\Delta f_{\text{зах}}$, що крім спрощення приймально-передавального обладнання дозволить мінімізувати перешкоди від ЧВС [11].

На рис. 3.17 а) і рис. 3.17 б) показані блок-схеми трансиверів OLT і ONU, відповідно. Як видно з рис. 3.17 б) після циркулятора оптичний сигнал фотодетектується, посилюється, за допомогою ПФ_{кер} виділяється сигнал підносійного каналу управління, що надходить на схему керування (Кер.), Де згідно з інструкціями від центральної станції формується керуючий сигнал для підстроювання ПФ_n так, щоб смуга пропускання ПФ_n збіглася з частотною смугою необхідної підносійної каналу на центральній частоті f_n . Таким чином, в ONU за допомогою каналу управління стає можливим вибір будь-якого з тих підносійних інформаційних каналів N в DS-напрямку. На

передачі в ONU формуються підносійний інформаційний канал і канал управління на частотах f'_n і $f''_{кер}$ відповідно. Після односмугового модулятора і циркулятора оптичний сигнал від одного ONU надходить на порт спліттера, де підсумовується з сигналами від інших ONU (рис. 3.14). Остаточно груповий сигнал в US-напрямку формується в точці «R» після мультиплексування оптичних сигналів з різними довжинами хвиль, що йдуть від всіх оптичних спліттерів.

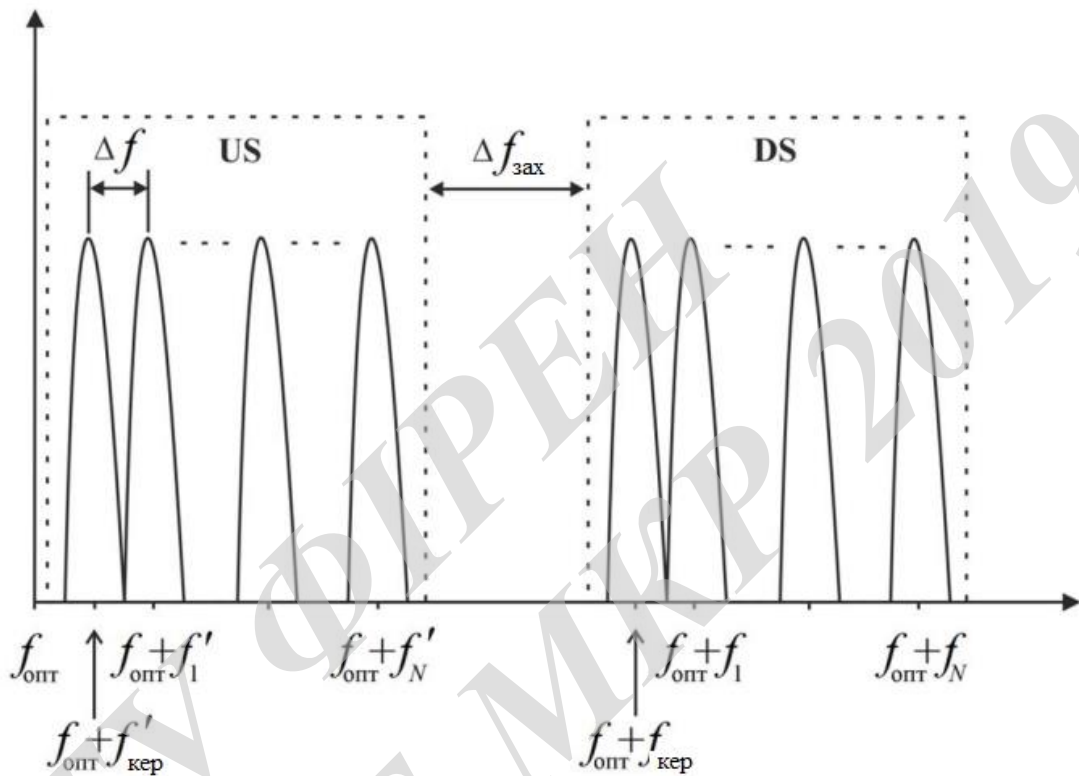


Рисунок 3.16 - Спектр сигналу в оптичному волокну на довжині хвилі λ_M

Поетапний розвиток існуючої мережі (рис. 3.14), що полягає в підключенні нових кінцевих пристроїв, не вимагає її реконфігурації. Під управлінням центральної станції за допомогою сигналів на $f_{кер}$ і $f''_{кер}$ єдиних для мережі відбувається перенастроювання нового кінцевого пристрою (рис. 3.17б).

Згідно з інструкцією, переданим на $f_{кер}$ відбувається підстроювання ПФ_n під частотну смугу вільного інформаційної підносійної каналу в DS-напрямку, а також настройка інформаційної підносійної каналу в US-напрямку. Одночасно з цим, центральна станція запам'ятовує виділені для нового кінцевого пристрою частоти інформаційних підносійних каналів. Таким чином можна поступово додавати кінцеві пристрої до максимально-можливої кількості для даної конфігурації. Більш того, на вимогу

центральної станції можлива тимчасове блокування ONU і запобігання несанкціонованого підключення ONU.

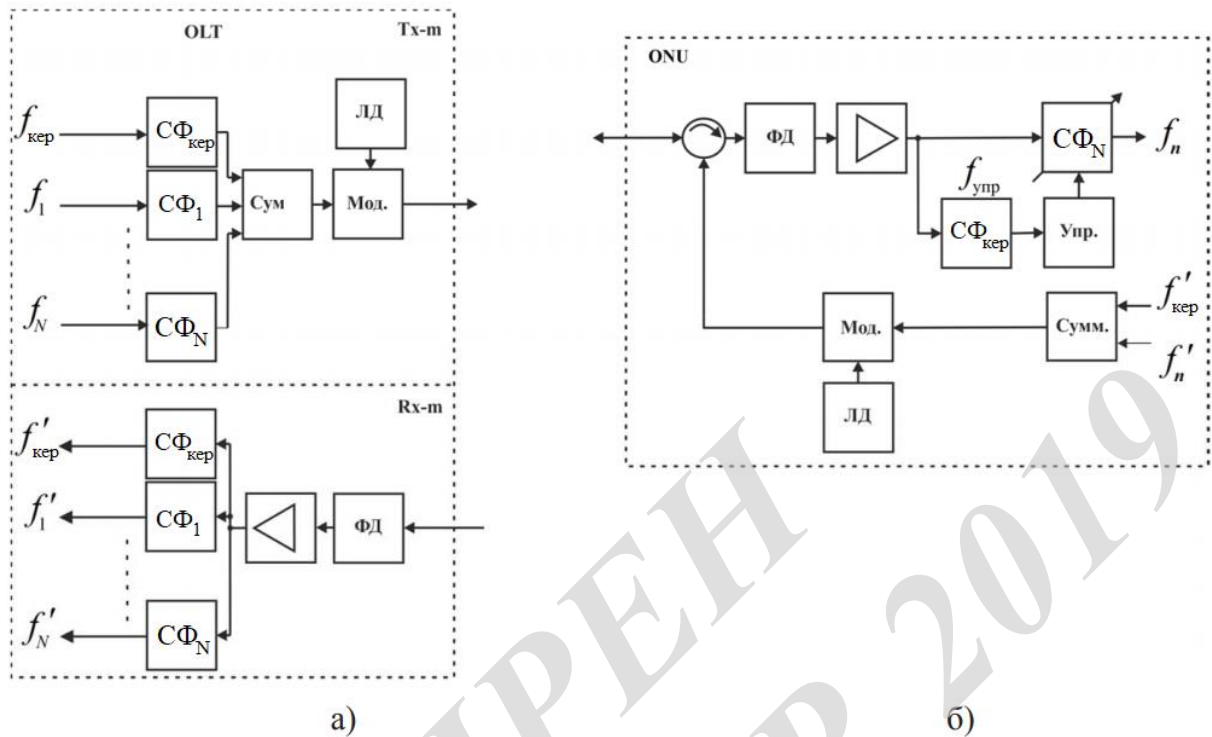


Рисунок 3.17 - Блок-схема трансиверів: а - OLT, б-ONU

Оцінка пропускної здатності FDM-PON-мережі. По волоконно-оптичному тракту FDM-PON-мережі поширюються досить широкосмугові оптичні сигнали, проте частотні смуги підносійних каналів порівняно вузькі і нерівномірності частотно-модуляційних характеристик оптичних компонент в мережі не роблять істотного впливу на показники якості передачі сигналів. Більш того, використання замість звичайної високошвидкісної імпульсної модуляції багаторівневих форматів модуляції, а також передача сигналів на коротку відстань (близько 20 км) дозволяє не враховувати дисперсійні спотворення сигналу. Основними джерелами обмеження пропускної здатності є нелінійні перешкоди, що виникають в волоконно-оптичному тракту. Наприклад, нелінійна взаємодія між сусідніми підносійними каналами через ЧХЗ призводить до виникнення комбінаційних частот. Деякі з них потрапляють в частотні діапазони підносійних каналів, що призводить до перехресних перешкод між каналами. Показано, що ЧХЗ є основним обмежуючим фактором для підносійних каналів форматів BPSK, QPSK, ASK. Наступне нелінійне явище - ФКМ проявляється у вигляді спотворень фази носійних оптичних сигналів, що призводить до викривлення рівня інформаційних сигналів при фотодетектуванні. Показано, що ФКМ є основним обмежуючим фактором для підносійних каналів формату QAM.

При сильних загрузках оптичних каналів (довжин хвиль) можуть виникати також спотворення оптичного рівня сигналу через ВКР. З іншого боку для компенсації втрат оптичних сигналів, що поширюються по волокну, використовують оптичний підсилювач. Однак їх шумові характеристики впливають на якість передачі каналного сигналу. Основним джерелом лінійних перешкод, які обмежують пропускну здатність системи, є так званій, посиленій спонтанний шум ОУ «ASE», що виникає після фотодетектування і змішування спонтанного шуму ОУ з корисним сигналом. Погіршення показника якості сигналу через ці перешкод на приймальній стороні після фотодетектора можна оцінити за допомогою Q-фактора. Відзначимо, що для досягнення ймовірності появи помилки (BER) менше 10^{-12} величина Q-фактора повинна перевищувати 17 дБ. Це справедливо при припущенні, що в апаратурі FDM-PON-мережі не застосовується FEC - пряма або упереджувальна корекція помилок. 1-е покоління FEC дозволяє зменшити показник якості (Q-фактор) до 11 дБ при тій же величині $BER=10^{-12}$, а 2-е покоління FEC - до 8,5 дБ.

Оцінка пропускну здатності FDM-PON-мережі заснована на обліку чинників, які погіршують якість передачі підносійних каналів: шуму підсилювача і нелінійних явищ в оптичному волокні. Показником якості передачі піднесуть каналних сигналів прийнятий Q-фактор.

Оцінимо вплив шуму «ASE» на якість сигналу підносійного каналу в двох напрямках. Припустимо, що ОУ компенсує лінійні втрати, що виникають в оптичному волокні, в циркулятора ONU, у всіх MUX/DMUX за відповідними напрямками (рис. 3.14).

Для DS-напрямки Q-фактор розраховується після ФД в крайовому пристрої ONU. Якщо позначити середню оптичну потужність на виході одного передавального оптичного модуля $Tx - m$ в обладнанні OLT як P_t , то з урахуванням того, що ОУ компенсує всі втрати до сплітерів 1:N, рівень потужності сигналу після сплітера, на вході ONU зменшиться і складе $\sim P_m/N$. Для оцінки впливу шуму «ASE» на Q-фактор в DS-напрямку скористаємося формулою:

$$Q_{ASE} = \frac{\sqrt{\frac{P_m}{N}} (\Delta S)_{\min}}{2N \sqrt{2h(f_0 + f_n) F \Delta f}} \cong \frac{\sqrt{P_m} (\Delta S)_{\min}}{2 \sqrt{2h(f_0 + f_n) F \Delta f N^3}}, \quad (3.8)$$

де N - кількість підносійних каналів, h - постійна Планка, $f_0 + f_n \approx f_0$ - оптична частота сигналу, F - коефіцієнт шуму ОУ (при розрахунках

прийнятий $F = 6\text{дБ}$), $(\Delta S)_{\min}$ - мінімальна відстань між символами інформаційних даних.

Для US-напрямки Q-фактор розраховується після ФД оптичного приймального модуля $Rx - m$, де $m = 1 \dots M$ в обладнанні OLT. Якщо позначити середню оптичну потужність на виході одного ONU як P_m , то після оптичного сплітера потужність зменшиться і складе $\sim P_m / \alpha$, де α_s - втрати в сплітері. Для оцінки впливу шуму «ASE» на Q-фактор в US-напрямку скористаємося формулою:

$$Q_{ASE}' \cong \frac{\sqrt{\frac{P_m}{\alpha_s} (\Delta S)_{\min}}}{2N \sqrt{hf_0 \Delta f F}}. \quad (3.9)$$

Для спрощення аналізу тут і далі припускаємо, що рівні оптичних потужностей передавальних модулів на стороні OLT і ONU однакові $P_m = P_m'$ отже, порівнюючи (3.8) і (3.9) неважко помітити:

$$Q_{ASE}' = \sqrt{\frac{N}{\alpha_s}} Q_{ASE}. \quad (3.10)$$

Так як втрати в сплітері $\alpha_s \leq 2,5$ дБ [38], а $N \geq 4$, то $Q_{ASE}' > Q_{ASE}$, тобто з точки зору завадостійкості менш схильні до шуму «ASE» сигнали в US-напрямку. Тому, забезпечуючи необхідний Q_{ASE} -фактор в DS- напрямку - гарантовано забезпечується Q_{ASE}' фактор в US-напрямку.

Як видно з (3.8), зі збільшенням рівня оптичної потужності зменшується вплив посиленого спонтанного шуму і поліпшується якість передачі сигналів. Таким чином, шум «ASE» визначає мінімально допустиму потужність оптичних передавальних модулів OLT і ONU. Однак зі збільшенням оптичної потужності передавальних модулів збільшується сумарний рівень потужності в оптичному волокні, що призводить до появи нелінійних явищ, які обмежують максимальний рівень оптичних потужностей передавальних модулів, обмежуючи тим самим пропускну здатність FDM-PON-мережі. Отже, для забезпечення необхідної якості передачі необхідно визначити допустимі рівні переданої оптичної потужності.

Для оцінки впливу ЧХЗ, ФКМ, ВКР і шуму «ASE» на підносійні канали скористаємося формулою з урахуванням втрат оптичної потужності у волокні з коефіцієнтом загасання α і довжиною L :

$$1/Q_{\Sigma}^2 \approx 1/Q_{ASE+SRS}^2 + 1/Q_{XPM}^2 + 1/Q_{FWM}^2, \quad (3.11)$$

де, $Q_{ASE+SRS}$ - показник якості сигналу в підносійних каналах з урахуванням шуму «ASE» і «виснаження» потужності сигналу через ВКР, який визначається (3.8):

$$Q_{ASE+SRS} \geq \frac{\sqrt{P_m(1-D_R)}(\Delta S)_{\min}}{2\sqrt{2h(f_0+f_n)F\Delta fN^3}}, \quad (3.12)$$

Q_{XPM} - показник якості сигналу в підносійних каналах з урахуванням шуму через фазової крос-модуляції:

$$Q_{XPM} \geq \frac{(\Delta S)_{\min}}{(1.35\gamma L_{ef} P_m \exp(\alpha L))^2}, \quad (3.13)$$

Q_{FWM} - показник якості сигналу в піднесуть каналах з урахуванням шуму через чотирьох хвильового зміщення:

$$Q_{FWM} = \left(\frac{P_m/2N}{\left(P_{ijk} \cdot N_{FWM} \right)_{(f_i+f_j-f_k)} + \left(P_{ijk} \cdot N_{FWM} \right)_{(2f_i-f_k)}} \right)^{1/2}, \quad (3.14)$$

де P_{ijk} - рівень оптичної потужності продукту виду $f_i + f_j - f_k$ або $2f_i - f_k$ на вході волокна:

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \left(d\gamma L_{ef}/3 \right)^2 \left(P_i \exp(\alpha L) \right)^3, \quad (3.15)$$

N_{FWM} - кількість комбінаційних частотних продуктів виду $f_i + f_j - f_k$ або $2f_i - f_k$, що потрапляють в підносійний канал с індексом n .

Зауважимо, що рознесення по частоті DS і US-напрямків з введенням захисної смуги $\Delta f_{зах}$ (рис. 3.16) зменшує вплив ЧХЗ. Так, наприклад, якщо вибрати ширину захисної смуги не менше величини, еквівалентної половині

частотного діапазону DS або US-напрямки, то кількість комбінаційних частот, що потрапляють в канали, зменшується. Це зменшення призводить до зростання Q_{FWM} на 1 дБ [11].

На рис. 3.18 наводяться графіки сумарного Q-фактора, розраховані по (3.11), в залежності від рівня оптичної потужності сигналу передавального модуля з різною кількістю підносійних каналів формату QPSK для коефіцієнтів ділення сплітера $N = 4, 8, 16, 32, 64$ при різних частотних інтервалах між ними ($\Delta f = 10$ ГГц, 1 ГГц, 100 МГц). На рис. 3.18 для наочності наведені приклади кривих Q_{ASE} і Q_{FWM} , відповідні $N = 4, \Delta f = 10$ ГГц, що обмежують знизу і зверху оптичну потужність сигналу передавального модуля. Видно, що для заданих значень N і Δf існують оптимальні значення оптичної потужності передавальних модулів, відповідні пікам Q-фактора. Якщо піки кривих знаходяться між значеннями 8,5 дБ і 17 дБ, то необхідно використовувати апаратуру з FEC. Як видно з рис. 3.18 для формування підносійних каналів формату QPSK при $N = 4, \Delta f = 10$ ГГц немає необхідності використовувати апаратуру з FEC, тому що існує область значень рівня потужності (від -4,1 дБм до +5,8 дБм) передавального модуля, де $Q \geq 17$ дБ. З іншого боку для того, щоб мінімізувати вплив нелінійних явищ на сигнали, необхідно встановити мінімально можливий рівень оптичної потужності в передавальних модулях так, щоб для всіх ONU забезпечити $Q \geq 8,5$ дБ і використовувати технологію FEC.

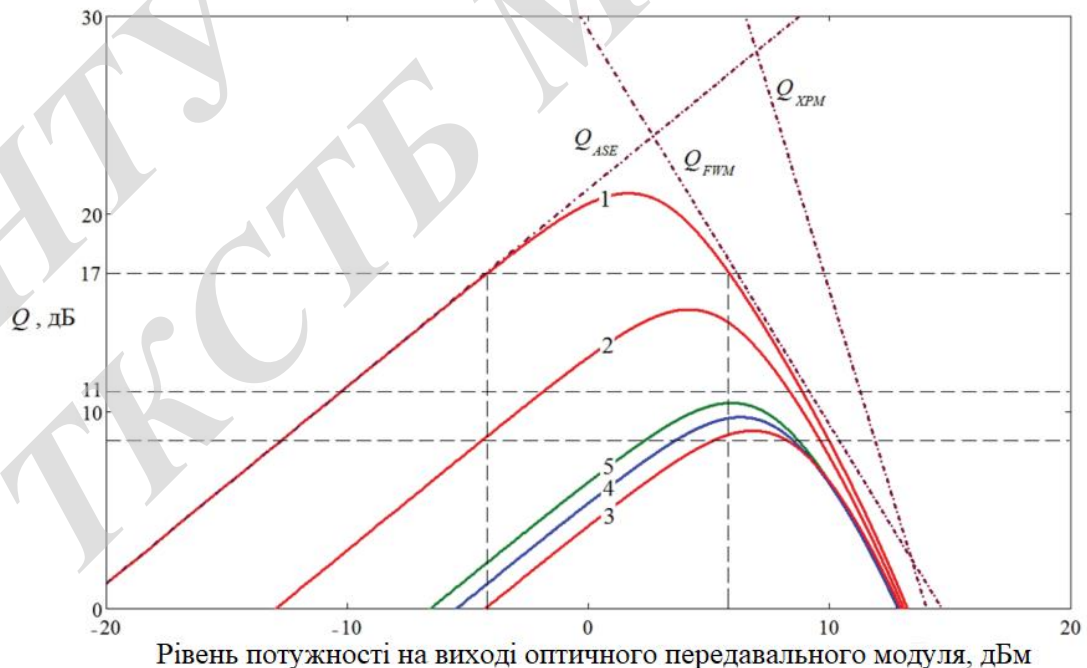


Рисунок 3.18 - Залежність Q-фактора для піднесуть каналів формату QPSK від рівня потужності сигналу передавального оптичного модуля: 1, 2, 3 - $N = 4, 8, 16$ при $\Delta f = 10$ ГГц; 4 - $N = 32, \Delta f = 1$ ГГц; 5 - $N = 64, \Delta f = 100$ МГц

На рис. 3.19 наводяться графіки сумарного Q-фактора, розраховані по (3.11), в залежності від рівня оптичної потужності сигналу передавального модуля для різних значень N і Δf при використанні в підносійних каналах формату модуляції 16-QAM. Відзначимо, що для забезпечення такої ж швидкості передачі сигналів як в каналах формату QPSK, для каналів формату 16-QAM потрібно в два рази менший частотний інтервал між підносійними. Як видно з рис. 3.19 піки кривих знаходяться нижче 17 дБ, що говорить про необхідність використання апаратури з FEC. Так як апаратура 1-го покоління FEC функціонує при $11 \text{ дБ} \leq Q < 17 \text{ дБ}$, то для випадку $N = 4$, $\Delta f = 5 \text{ ГГц}$ рівень потужності сигналів передають модулів не повинен виходити за межі $-3,6 \text{ дБм}$ і $+7,7 \text{ дБм}$. При використанні FEC 2-го покоління ці кордони розсуваються.

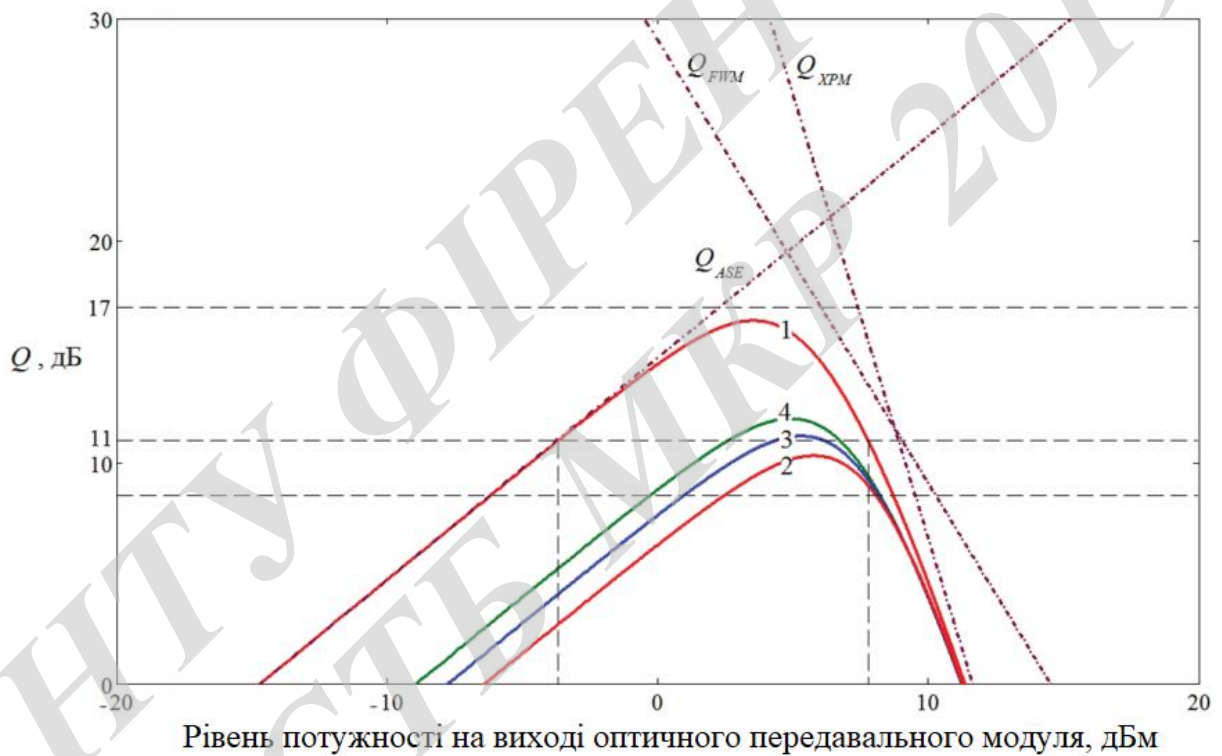


Рисунок 3.19 - Залежність Q-фактора для піднесує каналів формату 16-QAM від рівня потужності сигналу передавального оптичного модуля: 1, 2 - $N = 4$, 8 при $\Delta f = 5 \text{ ГГц}$; 3 - $N = 16$, $\Delta f = 500 \text{ МГц}$; 4 - $N = 32$, $\Delta f = 50 \text{ МГц}$

Встановимо відповідність між такими параметрами FDM-PON-мережі як коефіцієнт ділення сплітера, формат модуляції і бітова швидкість передачі сигналів в піднесує каналах. Проведемо розрахунок Q-фактора по (6.11) і виділимо лише ті випадки, які задовольняють умові $Q \geq 8,5 \text{ дБ}$. У Таблиці 6.1 представлені відповідності між коефіцієнтом ділення сплітера N , форматом модуляції в піднесує каналах і типом ONU. Канальні формати модуляції BPSK і ASK через низьку спектральної ефективності не представлені в табл.

3.1. Крім цього, розрахунки по (3.11) показали, що для забезпечення функціонування ONU-10G (10 Гбіт/с) коефіцієнт розподілу сплітера не повинен перевищувати величини 16 і 8 для сигналів з форматами модуляції BPSK і ASK, відповідно, що в свою чергу вимагає забезпечення смуги пропускання оптоелектронних компонент 640 ГГц і 320 ГГц, відповідно. Для сигналів в піднесуть каналах форматів модуляції QPSK при $N = 16, 8, 4$ і 16-QAM при $N = 8$ смуга пропускання оптоелектронних компонент має становити 320 ГГц, 160 ГГц, 80 ГГц і 80 ГГц, відповідно, що в табл. 3.1 позначено « * ». Очевидно, що витрати на розробку і впровадження таких широкосмугових оптоелектронних компонентів недоцільні, тому що це не відповідає концепції створення економічного обладнання, перш за все для користувача класу. Існуючі на сьогоднішній день оптоелектронні компоненти дозволяють формувати на одній довжині хвилі 128 або 64 піднесуть каналу формату модуляції QPSK з частотним інтервалом між каналами 100 МГц або 1 ГГц, відповідно. Таким чином, можливе створення призначеного для користувача устаткування типу ONU- 100M або ONU-1G і підключення на ділянках мережі (рис. 3.14) до сплітера з коефіцієнтами ділення $N=64$ або $N=32$. З табл. 3.1 слід, що підключення користувачького обладнання типу ONU-10G можливо на ділянках мережі, де коефіцієнт ділення $N = 4$ для двох форматів каналних сигналів 16-QAM і 64-QAM.

Таким чином, з представлених форматів модуляції для даної конфігурації FDM-PON-мережі найбільш привабливими є формат QPSK, що забезпечує швидкість передачі в межах від 100 Мбіт/с до 1 Гбіт/с і формат 16-QAM, що забезпечує швидкість передачі 10 Гбіт/с. Так, наприклад, можна організувати розподілену мережу, в якій на одній довжині хвилі можуть працювати або 64 пристрої ONU-100M або 32 пристрої ONU-1G або 4 пристрої ONU-10G.

Таблиця 3.1 - Відповідності між параметрами FDM-PON-мережі

N	Тип ONU, формат модуляції підносійних каналів			
	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
64	100M	-	-	-
32	1G	100M	-	-
16	10G *	1G	100M	100M
8	10G *	10G *	1G	100M
4	10G*	10G	10G	1G

Оцінимо максимальну швидкість передачі сигналів в FDM-PON-мережі при використанні на користувальницької стороні кінцевого обладнання однієї конфігурації. Якщо необхідна швидкість передачі не перевищує 100 Мбіт/с, то можна використовувати кінцеві пристрої ONU-100M, що дозволить організувати на одній довжині хвилі дуплексний зв'язок для 64 користувачів. Тоді при кількості довжин хвиль в волокні $M = 40$, загальна швидкість передачі сигналів в мережі складе $40 \times 2 \times 64 \times 100$ Мбіт/с = 512 Гбіт/с, а кількість користувачів - 2560. При тій же кількості довжин хвиль, але з кінцевими пристроями ONU-1G, що забезпечують дуплексну швидкість до 1 Гбіт/с, загальна швидкість передачі сигналів в мережі складе $40 \times 2 \times 32 \times 1$ Гбіт/с = 2,56 Тбіт/с, а кількість користувачів - 1280. Якщо буде потрібно забезпечити користувачів ще більш швидкісний дуплексний зв'язок (10 Гбіт/с), то загальна швидкість передачі сигналів в мережі складе $40 \times 2 \times 4 \times 10$ Гбіт/с = 3,2 Тбіт/с, а до кількості абонентів - 160.

Порівняємо пропускні спроможності запропонованої FDM-PON-мережі, існуючої GPON-мережі та мережі останнього покоління (за рекомендацією ІТУ-Т) NG-PON2, що використовує технологію TWDM [49]. У GPON-мережі і NG-PON2-мережі в низхідному напрямку швидкість передачі сигналів на одній довжині хвилі становить 2,5 Гбіт/с і 10 Гбіт/с, відповідно і «розподіляється» між кінцевими пристроями. Залежно від завантаження мережі і коефіцієнта ділення N оптичного сплітера середня швидкість в перерахунку на одне термінал зменшується і для $N = 4, 32, 64$ становить 625 Мбіт/с, 78 Мбіт/с, 39 Мбіт/с для GPON-мережі і 2,5 Гбіт/с, 312 Мбіт/с, 156 Мбіт/с для NG-PON2-мережі, відповідно. При тих же значеннях $N = 4, 32, 64$ у запропонованій FDM-PON-мережі забезпечується гарантована швидкість 10 Гбіт/с, 1 Гбіт/с, 100 Мбіт/с, відповідно. Найбільший приріст швидкості в порівнянні з існуючою GPON-мережею в 16 разів спостерігається на ділянках мережі з коефіцієнтом ділення сплітера $N = 4$. Основними перевагами запропонованої PON-мережі з частотним поділом каналів перед існуючою GPON-мережею і мережею NG-PON2, є симетричність швидкостей прийому-передачі, гарантована швидкість передачі і її багаторазове збільшення. Використання методу частотного поділу каналів в оптичному діапазоні в свою чергу дозволяє варіювати кількість кінцевих пристроїв в залежності від вимог до швидкості передачі. До одного «дерева» PON-мережі може підключатися від 160 до 2560 кінцевих пристроїв зі швидкостями передачі від 10 Гбіт/с до 100 Мбіт/с, відповідно, при цьому сумарна швидкість в оптичному волокні перевищить кілька Тбіт/с.

3.6. Висновки до третього розділу

1. Можливості технології частотного поділу каналів з точки зору єдиної універсальної архітектури дозволять конвертувати в єдину оптичну мережу доступу існуючі провідні мережі доступу і бездротові мережі різного призначення, використовуючи при цьому існуючі оптичні інфраструктури кільцевих опорних мереж і розгалужених PON-мереж.

2. Високонадійні кільцеві структури опорних мереж відрізняються від існуючих тим, що дозволяють комутувати частотно-розділені канали, сформовані як в оптичному діапазоні, так і радіохвиль, не вимагають координаційних протоколів і схем синхронізації.

3. PON-мережу з частотним поділом каналів відрізняється від існуючих тим що користувачам, в залежності від потреб, гарантовано виділяються ресурси мережі у вигляді частотних смуг, ширина яких визначається типом кінцевих пристроїв. Швидкість передачі в перерахунку на одного користувача може в 16 разів перевищити швидкість передачі в традиційних PON-мережах.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок витрат на проведення МКР

В даному розділі будуть проведені детальні розрахунки витрат на проведення НДДКР з дослідження механізму передачі даних і IP-мережах з використанням технології MPLS.

Для економічного розрахунку проведення НДДКР потрібно скласти кошторис витрат, який передбачає розрахунок визначених основних статей витрат.

Основна заробітна плата дослідників та розробників, яка розраховується за формулою [67]:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (4.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;

T_p – число робочих днів в місяці, 21 дн.;

t – число днів роботи розробника (дослідника).

Проведені розрахунки зводимо до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	11324,00	539,24	21	11324,00
2. Ст. науковий співробітник	9450,00	450,00	15	6750,00
3. Інженер-програміст	9200,00	438,10	15	6571,43
4. Фахівець-консультант IP-телефонії	9200,00	438,10	10	4380,95
Разом				35562,10

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p), що здійснюють підготовку робочих місць та пристроїв необхідних для досліджень, підготовку та формування баз даних тощо, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою [67]:

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (4.2)$$

де t_i - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

n - число робіт по видах та розрядах;

K_c - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками, $K_c = 1,1$;

C_i - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.

C_i визначається за формулою [67]:

$$C_i = \frac{M_n \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (4.3)$$

де, M_n - мінімальна місячна оплата праці, грн., $M_n = 4173,00$ грн.;

K_i - тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

T_p - число робочих днів в місяці, $T_p = 21$ дн.;

T_{zm} - тривалість зміни, $T_{zm} = 8$ годин.

Проведені розрахунки внесемо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Витрати на основну заробітну плату працівників

Найменування робіт	Трудомісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
1. Встановлення допоміжного обладнання	12,00	2	1,1	27,32	360,67
2. Інсталяція програмного забезпечення	8,00	4	1,35	33,53	295,09
3. Встановлення IP модулів	8,00	5	1,7	42,23	371,60
Разом					1027,35

Додаткова заробітна плата розробників, дослідників та працівників, які приймали участь в дослідженнях та розробці НДДКР з дослідження механізму передачі даних і IP-мережах з використанням технології MPLS

розраховується як 12 % від основної заробітної плати розробників та працівників:

$$Z_d = Z_o \cdot 12 / 100\% \quad (4.4)$$

$$Z_d = (35562,10 + 1027,35) \cdot 12 / 100 \% = 4390,73 \text{ (грн.)}$$

Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати:

$$H_z = (Z_o + Z_d) \cdot 22\% / 100\% \quad (4.5)$$

$$H_z = (35562,10 + 1027,35 + 4390,73) \cdot 22\% / 100\% = 9015,64 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали на даному етапі проведення НДДКР пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментального програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі офісних витратних матеріалів.

Витрати на матеріали, що були використані при проведенні досліджень, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою [67]:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \quad , \quad (4.6)$$

де, - H_i - витрати матеріалу i -го найменування, кг;

C_i - вартість матеріалу i -го найменування, грн./кг.;

K_i - коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = 1,1$;

n - кількість видів матеріалів,

Проведені розрахунки зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Папір офісний А4 білий (80%)	уп.	101,00	5,0	505,00
Диск оптичний (CD-R)	шт.	13,20	4,0	52,80
Органайзер офісний ВОХІТ-12	уп.	98,00	6,0	588,00
Канцелярські товари	компл.	164,00	5,0	820,00
Тонер (для заправки картриджа)	кг	6150,00	0,215	1322,25
FLASH-пам'ять (16 ГБ)	шт.	320,00	2,0	640,00
Всього				3928,05

З врахуванням транспортних витрат вартість матеріалів складе

$$M = 3928,05 \cdot 1,1 = 4320,86 \text{ грн.}$$

Витрати на комплектуючі, що були використані на дослідження механізму передачі даних і IP-мережах з використанням технології MPLS, розраховуються за формулою:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (4.7)$$

де: H_i — кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i — покупна ціна комплектуючих i -го виду, грн.;

K_i - коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = 1,1$;

n - кількість видів матеріалів.

Проведені розрахунки зводимо до табл 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Модуль підтримки цифрового потоку для IP-Zycoo CooII U50, U80 і U100	1	5700,00	5700,00
Escene ES410PE - IP-пристрій	2	2740,00	5480,00
MikroTik hAP ac ² - маршрутизатор	1	2520,00	2520,00
Escene ESH12 - комутатор	2	3120,00	6240,00
Всього			19940,00

Витрати на комплектуючі з урахуванням транспортних витрат складають:

$$H = 19940,00 \cdot 1,1 = 21934,00 \text{ (грн.)}$$

Амортизація обладнання для проведення досліджень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.8)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, приміщень тощо, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн.;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, приміщень під час розробки, місяців;

$T_г$ – строк корисного використання обладнання, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці.

Таблиця 4.5 - Величина амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	23800,00	4	1	495,83
СooII EX16S - шістнадцятиканальний FXS шлюз з підтримкою IP і SIP Зуссо	9430,00	3	1	261,94
Програмне забезпечення підтримки IP-мереж	25100,00	3	1	697,22
Місце оператора спеціалізоване	9980,00	5	1	166,33
Офісна оргтехніка	12100,00	4	1	252,08
Дослідницька лабораторія	176500,00	20	1	735,42
Всього				2608,83

Витрати на силову електроенергію на проведення досліджень розраховують за формулою [67]:

$$V_e = V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_n, \quad (4.9)$$

де, V – вартість 1 кВт-години електроенергії, $V = 2,21$ грн./кВт –година;

P – встановлена потужність обладнання, кВт.;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;

K_n – коефіцієнт використання потужності.

Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці

Таблиця 4.6 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати
Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	168,00	0,72	1	342,32
СооІІ EX16S - шістнадцятиканальний FXS шлюз з підтримкою IP і SIP Зуссо	110,00	0,02	1	6,23
Офісна оргтехніка	35,00	1,2	1	118,86
Місце оператора спеціалізоване	110,00	0,32	1	99,62
Всього				567,02

Інші витрати охоплюють: загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, витрати на відрядження, матеріали, окремі непередбачені витрати, зв'язок, витрати на інтернет-послуги тощо.

Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників.

Величина інших витрат складе:

$$I = (35562,10 + 1027,35) * 200\% / 100\% = 73178,90 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи.

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи:

$$B = 35562,10 + 1027,35 + 4390,73 + 9015,64 + 4320,86 + 21934,00 + 2608,83 + 567,02 + 73178,90 = 152605,43 \text{ (грн.)}$$

4.2 Визначення коефіцієнта наукової значимості отриманих результатів науково-дослідної роботи

Коефіцієнт наукової значимості результатів проведеної НДР K_{3H} можна підрахувати за формулою:

$$K_{3H} = \frac{\sum_1^3 b_i \cdot d_i}{\sum_1^3 b_{\max} \cdot d_i}, \quad (4.10)$$

де b_i - значимість отриманих результатів: b_1 - ступінь наукової новизни, b_2 - рівень теоретичної обґрунтованості, b_3 - ступінь експериментальної перевірки результатів.

Бальна оцінка отриманих результатів наведена в таблиці .

Максимальне значення отриманих результатів можна прийняти в межах 7...10 балів;

d_i - питома вага кожної характеристики, значення якої наведено в таблиці;

3 – кількість характеристик, за якими була зроблена оцінка результатів науково-дослідної роботи.

Таблиця 4.7 – Показники для оцінювання наукової значимості результатів виконання НДР

Характеристики	Питома вага характеристик	Бальна оцінка характеристик		
		Ступінь новизни b_1	Рівень теоретичної обґрунтованості b_2	Ступінь експериментальної перевірки результатів b_3
		1	3...5	7...10
b_1	0,500	Часткове удосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо	Суттєве удосконалення виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо	Нові напрямки в розробці виробів, технологій, матеріалів, програмного продукту, тощо. Створення принципово нової техніки
b_2	0,333	Позитивне рішення на основі зроблених узагальнень	Установлення залежностей, які використовувались в інших випадках	Відкриття нових шляхів рішення задачі
b_3	0,167	Експериментальна перевірка не робилась	Результати перевірялись на невеликій кількості даних	Результати перевірені на великій кількості даних

Підставляючи числові дані $d_1 = 0,5$, $d_2 = 0,333$, $d_3 = 0,167$, $b_{\max} = 9$ у вираз (4.10) оцінимо наукову значимість отриманих результатів:

$$K_{3H} = \frac{7 \cdot 0,5 + 7 \cdot 0,333 + 7 \cdot 0,167}{9 \cdot 0,5 + 9 \cdot 0,333 + 9 \cdot 0,167} = 0,78.$$

4.3 Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР

Внесок дослідника в досягнення отриманих результатів НДР можна розрахувати за формулою:

$$V = \frac{k_{ТВИ} \cdot Z_i}{\sum_1^n k_{ТВИ} \cdot Z_i}, \quad (4.11)$$

де $k_{ТВИ}$ - коефіцієнт творчої участі кожного виконавця НДР, який оцінюється наступним чином: проведення досліджень – 3 бали, робоче проектування – 1,5 бали, освоєння – 1,0 балів.

Якщо виконавець приймав участь в декількох видах робіт, то береться сума відповідних балів;

Z_i - заробітна плата кожного виконавця НДР;

n - кількість всіх виконавців НДР,

Розраховуємо внесок дослідника:

$$V = \frac{3 \cdot 9450,00}{3 \cdot 11324,00 + 3 \cdot 9200,00 + 1,5 \cdot 9200,00} = 0,42$$

4.4 Висновки до четвертого розділу

Загалом запланована науково-дослідна робота з дослідження механізму передачі даних в IP-мережах з технологією MultiProtocol Label Switching (MPLS) вимагає вкладення для проведення досліджень в межах 152600,00 грн.

Отримані результати досліджень мають високий рівень наукової значимості (в межах 0,78), що свідчить про доцільність проведення розробок.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основне завдання охорони праці – зменшення імовірності появи виробничого травматизму та захворювань під час забезпечення нормованих показників умов праці.

У даному розділі наводиться аналіз небезпечних, шкідливих та уражаючих для людини і навколишнього середовища чинників, які утворюються під час проведення удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення кута розсіювання лазерного променя за заданою безпечною відстанню, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні удосконалення, безпека у надзвичайних ситуаціях.

Під час удосконалення даного пристрою на працюючих впливають ті чи інші небезпечні і шкідливі виробничі фактори (НШВФ) фізичної та психофізіологічної груп згідно [69].

Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори: підвищена або понижена температура повітря робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці, підвищений рівень статичної електрики, недостатність або відсутність природного освітлення, недостатня освітленість робочої зони, пряма або відбита блискучість, підвищена яскравість світла.

Психофізіологічні НШВФ: нервово-психічні перевантаження: розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження аналізаторів.

5.1 Виробнича санітарія та гігієна праці

5.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Вибираємо для приміщення, в якому проводяться роботи з удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

Згідно із [70] допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні для теплого та холодного періодів року наведені в табл. X.1 додатку X.

Перепад температури повітря вздовж висоти робочої зони для всіх категорій робіт допускається до 3°C. Для опромінення менше 25% поверхні тіла людини, нормована інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), що використовуються при проектуванні виробничих приміщень (будівель), обладнання, технологічних процесів, вентиляцій, для контролю за якістю виробничого середовища. ГДК шкідливих речовин, що утворюються в даному виробничому приміщенні наведено в табл. X.2 додатку X.

З метою забезпечення нормованих показників мікроклімату та чистоти повітря робочої зони передбачено такі заходи:

- 1) у приміщенні має бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року;
- 2) здійснювати вологе прибирання кожного дня;
- 3) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

5.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях великі вимоги висуваються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводяться роботи з удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу, згідно [71] знаходимо, що вони відповідають III розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – середній, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд в.

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості для штучного освітлення наведені в табл. X.3 додатку X.

Так як приміщення розташоване в місті Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а вікна орієнтовані за азимутом 270° , то за таких обставин КЕО розраховується за виразом [3, 4]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (5.1)$$

де e_n – табличне значення КЕО, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N.6} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 (\%);$$

$$e_{N.c} = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02 (\%).$$

Для встановлення нормативних значень показників освітлення запропоновано такі заходи: за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним за допомогою газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення; застосування штучного освітлення в темний час доби.

5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого устаткування застосовується обладнання, робота якого генерує шум та вібрацію, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Встановлено, що приміщення, де відбувається робота з удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу може мати робочі місця із шумом та вібрацією, який створюється електродвигунами вентиляційної системи.

З метою запобігання травмуванню працівників під дією шуму та вібрації вони підлягає нормуванню. Головним нормативом з питань виробничого шуму, що діє на території України, є [74], згідно з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в виробничих приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, які приведені в **табл. X.4 додатку X**. Норми виробничих вібрацій наведені в **табл. X.5 додатку X** для 3-ї категорії (технологічна) типу "в".

Для встановлення допустимих показників віброакустичних коливань в приміщенні запропоновано такі заходи:

- 1) завчасне здійснення профілактичного ремонту;
- 2) застосування в конструкціях устаткування віброізоляції та акустичних екранів.

5.1.4 Виробничі випромінювання

Проведений аналіз умов праці показав, що приміщення, в якому проводиться робота з удосконалення може містити лазерні випромінювання.

Згідно [83] регламентуються гранично допустимі рівні (ГДР) для кожного режиму роботи лазера і його спектрального діапазону. Граничні дози при однократному впливі на очі і шкіру прямого чи розсіяного лазерного випромінювання наведені в **табл.Х.6 додатку Х**.

Для забезпечення допустимих параметрів лазерного випромінювання в приміщенні передбачено:

- 1) захист відстанню;
- 2) фарбування поверхонь приміщення для забезпечення коефіцієнта відбиття світла не більше 0,4.

Вихідні дані: потужність лазера $W = 0,15$ Вт, тривалість опромінення $t = 5$ с, безпечна відстань $L = 4$ м.

В якості засобу захисту працюючих від лазерного випромінювання вибираємо захист відстанню.

Безпечну відстань L можна розрахувати за формулою:

$$L = \frac{1,2}{\varphi} \sqrt{\frac{W}{E}} \quad [\text{м}], \quad (5.2)$$

звідки

$$\varphi = \frac{1,2}{L} \sqrt{\frac{W}{E}} \quad [\text{рад}], \quad (5.3)$$

де W – потужність лазера, Вт;

E – гранично допустима щільність потужності, Вт/м²;

φ – кут розсіювання променя, рад.

Гранично допустима щільність потужності для хвилі з довжиною $\lambda = 1800 \dots 2500$ нм і тривалості опромінення від 3 до 100 с визначається за формулою:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t} \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (5.4)$$

Підставивши у формулу (5.4) відоме значення тривалість опромінення, отримуємо гранично допустима щільність потужності:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{5} = 2236,07 \quad (\text{Вт/м}^2).$$

Використовуючи формулу (5.3) визначимо кут розсіювання лазерного променя

$$\varphi = \frac{1,2}{4} \sqrt{\frac{0,15}{2236,07}} = 0,00246 \text{ (рад).}$$

5.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу

5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Конструкція робочого місця, взаємне розташування його елементів та його розміри мають відповідати антропометричним, психофізіологічним та фізіологічним характеристикам працівника, а також характеру праці [76].

Площа одного робочого місця повинна складати не менше 6,0 м², об'єм приміщення – не менше як 20 м³, висота – не менше 3,2 м [77].

Інтер'єр приміщень потрібно оздоблювати дифузно-віддзеркалювальними матеріалами з коефіцієнтом відбиття: стелі 0,7-0,8; стін 0,4-0,5; підлоги 0,2-0,3. Поверхня підлоги має бути гладкою, не слизькою, без вибоїн, мати антистатичні властивості, зручною для вологого прибирання. Не дозволяється використовувати під час оздоблення інтер'єру полімери, які забруднюють повітря шкідливими хімічними речовинами та сполуками.

5.2.2 Електробезпека

В середині приміщення, в якому здійснюється робота з удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу, особливу увагу потрібно надати запобіганню небезпеки ураження електричним струмом. У відповідності до [78] це приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність високої (понад 75 %) вологості. Через це безпека експлуатації електрообладнання повинна забезпечуватись комплексом заходів, що передбачають застосування ізоляції струмовідних частин, захисних блокувань, захисного заземлення та ін [79].

5.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [80] приміщення, в якому проводиться робота з удосконалення пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу,

відноситься до категорії пожежної небезпеки Б. Дане приміщення відноситься до 3-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій приміщення, що розглядається наведені в табл. X.7. В таблиці X.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з удосконалення, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [81].

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях.

Іонізуючі випромінювання у радіоелектронній апаратурі (РЕА) викликають незворотні та зворотні процеси, внаслідок яких можуть відбуватись порушення працездатності електронних елементів, що спричиняє вихід з ладу приладу. Так як такі перетворення можуть спричинити відмови електронних підсистем, значні зусилля в останні роки скеровуються на розробку методів, що допомагають уникнути погіршення параметрів РЕА при опроміненні.

Впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) піддаються напівпровідникові прилади, конденсатори, резистори тощо. Це становить велику небезпеку для апаратури, добре захищеної від впливу інших загрозливих факторів. Тому потрібно пам'ятати про те, що захист апаратури від механічних пошкоджень ушкоджень не оберігає від дії ЕМІ. РЕА може втратити працездатність, перебуваючи у безпечних захисних спорудах.

5.3.1 Визначення області працездатності IP мережі в умовах дії іонізуючих випромінювань

Беручи до уваги елементну базу, яка використовується для реалізації IP мережі, складемо таблицю потужностей експозиційної дози опромінення для

кожного компонента $P_{зв.i}$, що спричиняють початок зворотних змін (табл. 5.1).

Визначаємо елемент, що найбільше піддається впливу випромінювання, тобто елемент із мінімальним значенням $P_{зв.min} = 10^4$ Р.

Розраховуємо граничне значення потужності експозиційної дози:

$$P_{зр} = K_{над} \cdot P_{зв.min} \cdot K_{носл} \text{ [Р/год]}; \quad (5.5)$$

$$P_{зр} = 0,94 \cdot 10^4 \cdot 2 = 18800 \text{ (Р/год)},$$

де $K_{над}$ – коефіцієнт надійності (приймається $K_{над} = 0,94$);

$P_{зв}$ – потужність експозиційної дози, яка відповідає початку зворотних змін в елементах;

$K_{носл}$ – коефіцієнт послаблення радіації (приймається $K_{носл} = 2$).

Таблиця 5.1 – Потужності експозиційної дози кожного компонента ІР мережі

№	Елементи ІР мережі	$P_{зв.i}$, Р/год	$P_{зв.min}$, Р/год
1	Транзистори SS8050	10^4	10^4
2	Діоди КД410	10^4	
3	Конденсатори А6	10^7	
4	Мікросхеми TL494	10^5	
5	Резистори Е6	10^8	

Таким чином, розроблюваний пристрій в умовах дії іонізуючих випромінювань буде працювати в межах зміни рівня радіації від 0 до 18800 Р/год, а допустимий час його безвідмовної роботи може скласти:

$$t_{дон} = \left(\frac{D_{зр} K_{носл}}{2P_1} + \sqrt{t_n} \right)^2 \text{ [год]}; \quad (5.6)$$

$$t_{дон} = \left(\frac{10^6 \cdot 2}{2 \cdot 18800} + \sqrt{1} \right)^2 = 2936,72 \text{ (год)}.$$

Це більш ніж достатньо для таких складних умов роботи радіоелементів.

5.3.2 Визначення області працездатності IP мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу

Вихідні дані: напруга живлення $U_{жс} = 220 \pm 5\%$ В; максимальна довжина горизонтальної струмопровідної частини електричної принципової схеми $l_T = 0,19$ м.

Як критерій безпеки роботи радіоелектронних систем до дії електромагнітного імпульсу приймаємо коефіцієнт безпеки:

$$U_{\partial} = U_{жс} + \frac{U_{жс}}{100} N \quad [\text{дБ}], \quad (5.7)$$

де U_{∂} – допустимі коливання напруги живлення, В;

$U_{\partial(\partial)}$ – напруга наведення за рахунок електромагнітного імпульсу в вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Визначаємо спочатку допустиме коливання напруги живлення:

$$K_{\partial} = 20 \lg \frac{U_{\partial}}{U_{\partial(\partial)}} \geq 40 \quad [\text{В}], \quad (5.8)$$

де $U_{жс}$ – робоча напруга живлення, В;

N – допустимі коливання напруги, %.

Визначаємо максимально очікувану напругу в горизонтальних лініях:

$$U_{\partial} = \frac{U_{\partial}}{10^{K/20}} \quad [\text{В}]. \quad (5.9)$$

де K – коефіцієнт безпеки ($K = 40$ дБ).

Визначаємо вертикальну складову напруженості електромагнітного поля за формулою:

$$E_{\partial} = \frac{U_{\partial}}{l_{\partial}} \quad [\text{В/м}]. \quad (5.10)$$

Розраховуємо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля за формулою

$$E_z = 10^{-3} E_e \quad [\text{В/м}], \quad (5.11)$$

Визначаємо вертикальну довжину горизонтальної струмопровідної частини електричної принципової схеми з формули:

$$E_z = \frac{U_e}{l_e} \quad [\text{В/м}], \quad (5.12)$$

звідки

$$l_e = \frac{U_e}{E_z} \quad [\text{м}]. \quad (5.13)$$

Після підстановки відомих значень у формули (5.9, ..., 5.11, 5.13) одержимо

$$U_{\partial} = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 231 \text{ (В)};$$

$$U_z = \frac{231}{10} = 2,31 \text{ (В)};$$

$$E_e = \frac{2,31}{0,19} = 12,1579 \text{ (В/м)};$$

$$E_z = 10^{-3} \cdot 12,1579 = 0,0122 \text{ (В/м)}.$$

$$l_e = \frac{2,31}{0,0122} = 189,34 \text{ (м)}.$$

Отже, РЕА ІР мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу має бути працездатною при значеннях E_z в межах від 0 до 0,0122 В/м і E_e в межах від 0 до 12,1579 В/м.

5.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи IP мережі в умовах надзвичайних ситуацій

Для зниження негативної дії на РЕА IP мережі можна застосувати такі заходи.

Для захисту IP мережі від альфа-випромінювання використовуються екрани зі скла товщиною декілька міліметрів. Для захисту від бета-випромінювання використовуються матеріали з малою атомною масою. Для цього використовують комбіновані екрани, у котрих з боку джерела розташовується матеріал з малою атомною масою товщиною, що дорівнює довжині пробігу бета-частинок, а за ним – з великою масою. Для захисту від рентгенівського та гамма-випромінювання застосовуються матеріали з великою атомною масою та з високою щільністю (свинець, вольфрам). Для захисту від нейтронного випромінювання використовують матеріали, котрі містять водень (вода, парафін), а також бор, берилій, кадмій, графіт. Враховуючи те, що нейтронні потоки супроводжуються гамма-випромінюванням, слід використовувати комбінований захист у вигляді шаруватих екранів з важких та легких матеріалів (свинець-поліетилен).

Для захисту від дії електромагнітного імпульсу потрібно застосувати захищене металічним екраном приміщення, в якому розміщена радіоелектронна апаратура.

5.4 Висновки до п'ятого розділу

Отже в даному розділі нами було розглянуто такі питання охорони праці, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки.

Також у даному розділі визначено область працездатності IP мережі в умовах дії загрозливих факторів НС. За результатами проведених розрахунків можна зробити висновок про те, що даний прилад здатний стійко працювати в середині будівлі, яка має коефіцієнт послаблення радіації 2 з потрібною надійністю в межах зміни потужності експозиційної дози від 0 до 18800 Р/год, а допустимий час його безвідмовної роботи може скласти 2936,72 год. Також визначено, що РЕА IP мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу має бути працездатною при значеннях E_2 в межах від 0 до 0,0122 В/м і E_6 в межах від 0 до 12,1579 В/м. Розроблено превентивні заходи з покращення безпеки роботи IP мережі в умовах НС.

ВИСНОВОК

На закінчення слід зазначити, що викладений у магістерській кваліфікаційній роботі матеріал свідчить про багатогранність розглянутої проблеми, як з точки зору теорії, так і практики. В даний час ще не всі порушені в роботі питання досить повно вивчені і експериментально підтверджені, і багато підлягає подальшому дослідженню.

У МКР розглянуто основні методи збільшення швидкості передачі сигналів в мережах доступу за допомогою частотного поділу каналів в оптичному та радіочастотний діапазонах:

1. Запропоновано нові технічні рішення для збільшення пропускну здатності існуючих PON-мереж шляхом незначних змін в оптичній інфраструктурі мережі доступу, заміни активного обладнання на більш широкосмугове з частотним розподілом каналів:

1.1. Розроблено три схеми кільцевих опорних мереж, що мають високу надійність функціонування. Основною відмінністю запропонованих мереж від існуючих кільцевих структур є можливість комутації каналів, сформованих як в радіодіапазоні, так і в оптичному діапазоні за допомогою нескладних перетворень сигналів, а також відсутність координаційних протоколів і схем синхронізації. Гнучкість мереж дозволяє організувати широкосмугові канали за допомогою сучасних цифрових методів модуляції і обробки даних, конвертувати в єдину оптичну мережу доступу бездротові і дротяні мережі різного призначення.

1.2. Розроблено варіант PON-мережі з підвищеною пропускну спроможністю. Основна відмінність запропонованої мережі від існуючих PON- мереж полягає в наданні користувачам широкосмугових послуг з гарантованою швидкістю, як в низхідному, так і висхідному напрямку передачі. Використання частотного поділу каналів в оптичному і радіодіапазоні дозволило значно збільшити кількість користувачів і загальну пропускну здатність мережі в порівнянні з аналогічними показниками існуючих PON-мереж. Максимальна пропускна здатність PON-мережі, що використовує частотний поділ каналів, обмежується нелінійними явищами, що виникають в оптичному волокні. Одне «дерево» PON-мережі забезпечує дуплексним зв'язком зі швидкість передачі 100 Мбіт/с 2560 користувачів, зі швидкістю 1 Гбіт/с 1280 користувачів або зі швидкістю 10 Гбіт/с 160 користувачів. Сумарна швидкість в оптичному волокні перевищує кілька Тбіт/с.

2. Розроблено математичні методи і комп'ютерні моделі, що дозволяють оцінити спотворення багатоканальних сигналів при проходженні через компоненти волоконно-оптичного тракту:

2.1. Розроблено моделі для дослідження впливу нелінійних характеристик оптоелектронних модулів при модуляції і детектуванні багатоканальних сигналів з частотно-розділеними каналами різних форматів модуляції.

2.2. Розроблено моделі для оцінки спотворень багатоканальних сигналів з різними форматами модуляції при поширенні по дисперсійного оптичного волокна і прямому детектуванні оптичного сигналу.

2.3. Розроблено моделі для розрахунку спектрального розподілу шумів биття між сигналами підносійних каналів після фотодетектора.

2.4. Розроблено методику розрахунку спотворень багатоканального сигналу з різними форматами модуляції при його поширенні через оптичне волокно, що працює в нелінійному режимі.

2.5. Розроблено модель, що дозволяє оцінити спектральний розподіл небажаних частотних складових, що виникають через чотирьох хвильового зміщення в оптичному волокні.

2.6. Розроблено новий спосіб вимірювань показника якості сигналу при чотирьох хвильового зміщення в оптичному волокні.

Результати, отримані в МКР, дозволяють модернізувати існуючі та проектувати нові оптичні мережі доступу з різними типами частотно-розділених каналів. Використання імітаційного моделювання процесу передачі, а також оціночні формули для розрахунків на комп'ютері дозволяють детально оцінити спотворення, як в індивідуальних каналах, так і в груповому багатоканальному сигналі, виключаючи постановку складних експериментальних досліджень на мережі доступу, обмежуючись меншим обсягом досліджень, а при створенні вимірювального обладнання - меншою каналної завантаженням. Розроблені моделі та методики розрахунку можуть застосовуватися при проектуванні і розробці оптичних мереж доступу наступного покоління.

Перспективи подальшої розробки теми

Перспективним напрямком розвитку мереж доступу може стати використання когерентних технологій. Важливим напрямком досліджень є створення вимірювального обладнання, вбудованого в систему контролю для оцінки показників якості каналних сигналів в залежності від завантаження мережі - допустимих, максимальних, середніх і пікових потужностей переданих сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 5G уже на пороге // Первая миля. – 2017. – № 7. – С. 26-31. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.lastmile.su/files/article_pdf/6/article_6349_619.pdf.
2. Вандич, А. П. Прикладные аспекты применения сетевых технологий WDM- PON / А. П. Вандич, В. В. Ефимов, И. Е. Никульский, О. А. Степуленок // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5, – № 1. – С. 34- 43.
3. Варданян, В. А. Влияние помех от четырехволнового смещения на спектрально разделенные каналы в пассивных оптических сетях доступа / В. А. Варданян // Автометрия. – 2017. –Т. 53, – № 1. – С. 63-72.
4. Варданян, В. А. Влияние фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции на OFDM-сигналы в волоконно-оптических сетях доступа / В. А. Варданян // Квантовая электроника. – 2018. – № 4. – С. 395-400.
5. Варданян, В. А. Влияние четырехволнового смешивания на Q-фактор в ВОСП с мультиплексированием по длинам волн / В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ. – 2016. – С. 229-233.
6. Варданян, В. А. Диаграмма направленности полупроводниковых лазеров с торцевым излучением. Приближенный анализ / В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ. – 2015. – Т. 1, – С. 139-141.
7. Варданян, В. А. Имитационное моделирование ВОСП с уплотнением поднесущих каналов формата QAM / В. А. Варданян // Информатика и проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ. – 2013. – С. 105-106.
8. Варданян, В. А. Имитационное моделирование процесса передачи OFDM сигналов по дисперсионному волоконно-оптическому тракту / В. А. Варданян // Т-сomm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2017. – № 11. – С. 18-24.
9. Варданян, В. А. Исследование нелинейных характеристик полупроводниковых лазерных диодов : практикум / В. А. Варданян. – Новосибирск : СибГУТИ, 2013. – 27 с.

10. Варданян, В. А. Исследование переходных процессов в полупроводниковых лазерных диодах на резонаторах Фабри - Перо с использованием компьютерного моделирования / В. А. Варданян // Информатика и проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ. – 2013. – С. 106-107.

11. Варданян, В. А. Исследование распределения продуктов четырехволнового смешивания в ВОСП с ЧРК / В.А.Варданян // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 2. – С. 78-84.

12. Варданян, В. А. Методика оценки и компенсация шума биений между поднесущими OFDM-сигнала в волоконно-оптических системах передачи с прямым фотодетектированием / В. А. Варданян // Автометрия. – 2018. –Т. 54, – № 3. – С. 94-103.

13. Варданян, В. А. Методика оценки отношения сигнал-шум в волоконно - оптических системах передачи с частотным разделением каналов/ В. А. Варданян // Измерительная техника. – 2017. – № 7. – С. 53-57.

14. Варданян, В. А. Методика расчета тока модуляции лазерного диода при одновременной передаче цифрового и частотно-уплотненного многоканального ТВ-сигналов по волоконно-оптическому тракту / В. А. Варданян // Телекоммуникации. – 2015. – № 2. – С. 31-37.

15. Варданян, В. А. Моделирование процесса уширения спектра сигналов из-за явлений фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне в двухканальном режиме / В. А. Варданян, А. Н. Сычук // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2017. – С. 147-152.

16. Варданян, В. А. Модуляция излучения лазерного диода многоканальными цифровыми ТВ-сигналами 64-QAM и 256-QAM / В. А. Варданян // Автометрия. – 2015. –Т. 51, – № 6. – С. 12-16.

17. Варданян, В. А. Модуляция лазерного диода многоканальным цифровым ТВ-сигналом формата QAM64/256 / В. А. Варданян // Материалы семинара: 6й Российский семинар по волоконным лазерам. – Новосибирск: Академгородок. – 2014. – С. 152-154.

18. Варданян, В. А. Нелинейные искажения OFDM-сигнала в оптоэлектронных компонентах волоконно-оптических сетей доступа / В. А. Варданян // Материалы семинара: 8й Российский семинар по волоконным лазерам. – Новосибирск: Академгородок. – 2018. – С. 222-223.

19. Варданян, В. А. Одноволоконная оптическая система передачи с DWDM каналами. Влияние продуктов четырехволнового смешивания / В. А. Варданян // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016». – Новосибирск: НГТУ. – 2016. – Т. 7, – С. 23-24.

20. Варданян, В. А. Определение максимального количества поднесущих каналов в волоконно-оптических системах передачи с прямым фотодетектированием / В. А. Варданян // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, – № 1. – С. 33-37.

21. Варданян, В. А. Отказоустойчивая кольцевая ВОСП, использующая переприем поднесущих каналов в узлах / В.А.Варданян // Телекоммуникации. – 2015. – № 7. – С. 32-37.

22. Варданян, В. А. Оценка количества спектральных и поднесущих каналов в волоконно-оптических сетях доступа при однополосной оптической модуляции / В. А. Варданян // Автометрия. – 2016. – Т. 52, – № 3. – С. 116-124

23. Варданян, В. А. Оценка пропускной способности пассивной оптической сети доступа с частотным разделением поднесущих каналов / В. А. Варданян // Электросвязь. – 2017. – № 7. – С. 61-66.

24. Варданян, В. А. Оценка чувствительности оптического приемника с предварительным усилителем для ВОСП с поднесущими каналами / В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ. – 2015. – Т. 1, – С. 142-143.

25. Варданян, В. А. Применение оптических однополосных OFDM-сигналов в PON-сетях / В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2018. – С. 148-152.

26. Варданян, В. А. Применение распределенного усиления Рамана в пассивных оптических сетях доступа / В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ. – 2014. – С. 72-73.

27. Варданян, В. А. Результаты моделирования передачи OFDM сигналов по оптическому волокну / В. А. Варданян // Фотон-Экспресс. – 2017. – № 6. – С. 75- 76.

28. Варданян, В. А. Увеличение пропускной способности существующих PON- сетей с помощью спектрального разделения каналов и использования отражательных полупроводниковых усилителей-

ремодуляторов / В. А. Варданян, А. А. Драгунова // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2017. – С. 141-146.

29. Варданян, В. А. Учет нелинейного явления четырехволнового смешивания в WDM-PON сетях / В. А. Варданян // Материалы семинара: 7й Российский семинар по волоконным лазерам. – Новосибирск: Академгородок. – 2016. – С. 181-182.

30. Варданян, В. А. Физические основы оптики: Учебное пособие. - 2-е изд., перераб. / Варданян В. А. - СПб.: Издательство "ЛАНЬ", 2018. – 272 с.

31. Гуркин, Н. В. Зависимость коэффициента ошибок от мощности сигнала и длины однопролетной одноканальной когерентной линии связи (100 Гбит/с) с поляризационным мультиплексированием / Н. В. Гуркин, В. А. Коньшев, О. Е. Наний, А. Г. Новиков, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев // Квантовая электроника. – 2015. – № 1. – С. 69-74.

32. Гуркин, Н. В. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK / Н. В. Гуркин, О. Е. Наний, А. Г. Новиков, С. О. Плаксин, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев // Квантовая электроника. – 2013. – № 6. – С. 550-553.

33. Жителев, А. Е. Нелинейные искажения как нелинейный шум в когерентных волоконно-оптических линиях связи / В. А. Коньшев, С. Н. Лукиных, О. Е. Наний, В. Н. Трещиков, Р. Р. Убайдуллаев / Квантовая электроника. – 2017. – № 12. – С. 1135-1139.

34. Зайферт, Т. Е. Способы компенсации нелинейных искажений OFDM- сигналов при передаче по оптическому волокну / Т. Е. Зайферт, В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2018. – С. 153- 161.

35. Кучерявый А. Е. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017-2020 годы / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А. И. Выборнова, Р.Я. Пирмагомедов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4, – № 3. – С. 1- 14.

36. Леонов, А. Развитие скоростных DWDM-систем по нескольким поднесущим / А. Леонов, М. Слепцов, В. Трещиков // Первая миля. – 2016, № 2. – С. 42–48.

37. Ghafoor, S. Sub-carrier-multiplexed duplex 64-QAM radio-over-fiber transmission for distributed antennas / S. Ghafoor, L. Hanzo // IEEE Communications Letters. – 2011. – Vol. 15, – № 12. – P. 1368-1371.

38. Guo, Q. Performance enhancement in RSOA-based WDM passive optical networks using level coding / Q. Guo, A. V. Tran // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2013. – Vol. 31, – № 1. – P. 67-73.

39. Gutierrez, F. A. Impact of band rejection in multichannel broadband subcarrier multiplexing / F. A. Gutierrez, P. Perry, F. Smyth, A. D. Ellis, L. P. Barry // *IEEE / OSA Optical Communications and Networking*. – 2015. – Vol. 7, – № 4. – P. 248-252.

40. Gutierrez, F. A. Optimum bias point in broadband subcarrier multiplexing with optical IQ modulators / F. A. Gutierrez, P. Perry, F. Smyth, A. D. Ellis, L. P. Barry // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – Vol. 33, – № 1. – P. 258-266.

41. Gutierrez, F. A. WDM orthogonal subcarrier multiplexing / F. A. Gutierrez, E.

42. P. Martin, P. Perry, A. D. Ellis, P. M. Anandarajah, L. P. Barry // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34, – № 8. – P. 1815-1823.

43. Haas, H. What is LiFi? / H. Haas, L. Yin, Y. Wang, C. Chen // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34, – № 6. – P. 1533-1544.

44. Hashemi, S. E. Relative intensity noise (RIN) in high-speed VCSELs for short reach communication / Master of Science Thesis in Photonic Engineering / Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden, 2012.

45. Hmood, J. K. Performance analysis of an all-optical OFDM system in presence of non-linear phase noise / J. K. Hmood, S. W. Harun, S. D. Emami, A. Khodaei, K. A. Noordin, H. Ahmad, H. M. H. Shalaby // *OSA Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, – № 4. – P. 3886-3900.

46. Hussin, S. Performance analysis of RF-pilot phase noise compensation techniques in coherent optical OFDM systems / S. Hussin, K. Puntsri, R. Noe // 17th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC). – 2012. June.

47. Сычук, А. Н. Моделирование процесса уширения спектра сигналов из-за явлений фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне в многоканальной волоконно-оптической системе передачи / А. Н. Сычук, В. А. Варданян // *Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции*. – Новосибирск: СибГУТИ, 2018. – С. 162-168.

48. Шувалов, В. П. Оптические сети доступа большого радиуса действия / В. П. Шувалов, В. Г. Фокин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 188 с.

49. Щербаков, В. В. Передача сигналов модуляции интенсивности света в аналоговых волоконно-оптических линиях связи / В. В. Щербаков, А. Ф. Солодков, А. А. Задерновский // РЭНСИТ. – 2016. – Т 8, – № 1. – С. 9-23.

50. Abed, H. J. Recent four-wave mixing suppression methods / H.J. Abed, N.M. Din, M.H. Al-Mansoori, H.A. Fadhil, F. Abdullah // Optik. – 2013. – Vol. 124, – № 15.

51. – P. 2214-2218.

52. Ali, A. Design considerations and performance comparison of high-order modulation formats using OFDM / A. Ali, J. Leibrich, W. Rosenkranz // Journal of Networks. – 2012. – Vol. 7, – № 5. – P. 757-763.

53. Amiralizadeh, S. Single-fiber lightwave centralized WDM-OFDMA-PON with colorless optical network units / S. Amiralizadeh, A. T. Nguyen, C. S. Park, L. A. Rusch

54. // Journal of Optical Communications and Networking. – 2016. – Vol. 8, – № 4. – P. 196-205.

55. Buset, J. M. Bandwidth efficient bidirectional 5 Gb/s overlapped-SCM WDM PON with electronic equalization and forward-error correction / J. M. Buset, Z. A. El-Sahn, D. V. Plant // OSA Optics Express. – 2012. – Vol. 20, – № 13. – P. 14428-14436.

56. Buset, J. M. Experimental demonstration of a 10Gb/s RSOA-based 16-QAM subcarrier multiplexed WDM PON / J. M. Buset, Z. A. El-Sahn, D. V. Plant // OSA Optics Express. – 2014. – Vol. 22, – № 1. – P. 1-8.

57. Chen, M. Experimental demonstration of real-time adaptively modulated DDO- OFDM systems with a high spectral efficiency up to 5.76bit/s/Hz transmission over SMF links / M. Chen, J. He, J. Tang, X. Wu, L. Chen // OSA Optics Express. – 2014. – Vol. 22, – № 15. – P. 17691-17699.

58. Chowdhury, P. K. Enhances crosstalk tolerance in RSOA based WDM-PONs by using coded RZ modulation / P. K. Chowdhury // Optik. – 2014. – Vol. 125, – № 4. – P. 2959-2962.

59. Chowdhury, R. Designing of next-generation hybrid optical-wireless access network / R. Chowdhury, A. Shami, K. Almustafa // Conference: 14th International Conference on Innovations for Community Services (I4CS), – 2014. June. – P. 1-7.

60. Dimitrov, S. Principles of LED light communications: Towards networked Li-Fi

61. / S. Dimitrov, H. Haas. – United Kingdom. : Cambridge University Press, 2015. – 207 p.

62. Erk111nc, M. S. Performance comparison of single-sideband direct detection Nyquist-subcarrier modulation and OFDM / M. S Erk111nc., S. Pachnicke, H. Griesser, B. C. Thomsen, P. Bayvel, R. I. Killey // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2015. – Vol. 33, – № 10. – P. 2038-2046.

63. Feng, Q. Impact of backscattering noise on upstream signals in full-duplex bidirectional PONs / Q. Feng, W. Li, Q. Zheng, J. Han, J. Xiao, Z. He, M. Luo, Q. Yang, S. Yu// OSA Optics Express. – 2015. – Vol. 23, – № 12. – P. 15575-15586.

64. Листвин, В. DWDM-системи / В. Листвин, В. Трещиков. . – М.: Техносфера, 2015. – 296 с.

65. Назаров, Л. Е. Исследование эффективности алгоритмов приема сигнальных конструкций на основе OFDM сигналов, устойчивых к сосредоточенным по спектру помехам / Л. Е. Назаров, А. А. Зудилин // Журнал Радиоэлектроники. – 2017. – № 12. – С. 1-16.

66. Пинчук, А. Пять направлений развития сетей доступа / А. Пинчук, Н. Соколов // Первая миля. – 2017. – № 5. – С. 30-35.

67. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами наукового напрямку економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В.О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.

68. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75с.

69. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

70. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

71. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

72. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.

73. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

74. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.

75. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

76. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. –

Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

77. Правила улаштування електроустановок. 2-е вид., перероб. і доп. – Х: "Форт", 2009. – 736 с.

78. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.

79. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.

80. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.

81. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

82. СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,
канд. техн. наук, професор
Г.Г.Бортник
“ _ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ
ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ
08-34.МКР.007.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ
Городецька О.С.

Виконавець: ст. гр. ТКС-18м
Миронов А.Г.

Вінниця-2019

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “02” 10 2019 року № 254 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 02.09.2019 р.

Дата закінчення: 09.12.2019 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є науково-обґрунтоване рішення проблеми збільшення швидкості передачі сигналів в мережах доступу, шляхом застосування частотного поділу каналів в оптичному та радіочастотному діапазонах, розробка теоретичних положень, методик та моделей для розрахунку показників якості сигналів з різними форматами модуляції в різних режимах функціонування оптичного тракту, а також розробка структурних схем вузлів і мереж доступу.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- аналіз особливостей застосування частотного поділу каналів в радіодіапазоні частот з подальшим перенесенням отриманого багатоканального сигналу в оптичний діапазон, подальшого оптичного мультиплексування і передачі по оптичному тракту з прямим фотодетектуванням на приймальній стороні;
- розробка імітаційних моделей для дослідження впливу нелінійних характеристик оптоелектронних модулів при модуляції і детектуванні багатоканального сигналу з частотно-розділеними каналами різних форматів модуляції;

- визначення оптимальних параметрів оптичних пристроїв для прийому багатоканальних сигналів з частотним поділом каналів різних форматів модуляції;

- дослідження спотворень, що виникають через дисперсійні властивості оптичного волокна і розробка математичної моделі для оцінки цих спотворень в частотно-розділених каналах різних форматів модуляції;

- дослідження спотворень сигналів в частотно-розділених каналах різних форматів модуляції, викликаних нелінійними явищами в оптичному волокні: чотирьох хвильового зміщення (ЧХЗ), фазової самомодуляції (ФСМ) і фазової крос-модуляцією (ФКМ), вимушеним комбінаційним розсіюванням (ВКР); розробка математичних моделей для оцінки їх впливу на сигнали;

- розробка і дослідження структурних схем опорних оптичних мереж і PON-мережі з частотним поділом каналів.

Об'єкт дослідження є пасивні оптичні мережі доступу, що представляють собою складову частину мультисервісної мережевої інфраструктури.

Предмет дослідження є комплекс методів аналізу спотворень і оцінки показників якості сигналів в пасивних оптичних мережах доступу з частотним поділом каналів, як в оптичному діапазоні, так і радіохвиль.

Основними завданнями роботи є:

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;
- сучасний стан і перспективи розвитку частотного поділу каналів у ВОСП;

- пряме фотодетектування оптичних сигналів із частотним розподілом каналів;

- приклади волоконно-оптичних мереж доступу з частотним розділенням каналів.

- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;

- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Проведені дослідження і розроблені методики можуть бути використані для вирішення завдань по насиченню ринку ємними і гнучкими мультисервісними телекомунікаційними системами, а також, фізичного моделювання волоконно-оптичних трактів і їх компонентів при різному завантаженні мережі. Запропоновані методики розрахунку показників якості сигналів дозволять забезпечити єдиний підхід до проектування, обслуговування та експлуатації обладнання оптичних мереж з частотним поділом каналів, що в свою чергу призведе до уніфікації обладнання та підвищенню якості обслуговування користувачів мережі.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах звіту з переддипломної практики “Підвищення ефективності пасивних оптичних інфокомунікаційних мереж доступу”, який виконувався у ВНТУ 2019/2020 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали цього звіту.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение / Бернгард Скляр ; [пер. с англ]. – М.: Изд. Дом “Вильямс”, 2003. – 1104с.

3.2 Варданян, В. А. Влияние фазовой само модуляции и фазовой кросс-модуляции на OFDM-сигналы в волоконно-оптических сетях доступа / В. А. Варданян // Квантовая электроника. – 2018. – № 4. – С. 395-400.

3.3 Варданян, В. А. Методика оценки и компенсация шума биений между поднесущими OFDM-сигнала в волоконно-оптических системах передачи с прямым фотодетектированием / В. А. Варданян // Автометрия. – 2018. –Т. 54, – № 3. – С. 94-103.

3.4 Варданян, В. А. Применение оптических однополосных OFDM-сигналов в PON-сетях / В. А. Варданян // Современные проблемы

телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2018. – С. 148-152.

3.5 Зайферт, Т. Е. Способы компенсации нелинейных искажений OFDM- сигналов при передаче по оптическому волокну / Т. Е. Зайферт, В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2018. – С. 153- 161.

3.6 Сычук, А. Н. Моделирование процесса уширения спектра сигналов из-за явлений фазовой самомодуляции и фазовой кросс-модуляции в оптическом волокне в многоканальной волоконно-оптической системе передачи /А. Н. Сычук, В. А. Варданян // Современные проблемы телекоммуникаций: Российская научно-техническая конференция: материалы конференции. – Новосибирск: СибГУТИ, 2018. – С. 162-168.

3.7 Шувалов, В. П. Оптические сети доступа большого радиуса действия / В. П. Шувалов, В. Г. Фокин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 188 с.

3.8 Листвин, В. DWDM-системы / В. Листвин, В. Трещиков. . – М.: Техносфера, 2015. – 296 с.

3.9 Положення про кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. О. Н. Романюк, Р. Р. Обертюх, Т. О. Савчук, Л. П. Громова – Вінниця : ВНТУ, 2015 – 27 с.

3.10 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.11 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.12 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.13 Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. Под ред. Э.Т.Романьчевой.- М: Радио и связь, 1989.

3.14 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи ТКС-18м Миронов А.Г.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження методу збільшення швидкості передачі сигналів в мережах доступу, шляхом застосування частотного поділу каналів в оптичному та радіочастотний діапазонах, розробка теоретичних положень, методик та моделей для розрахунку показників якості сигналів з різними форматами модуляції в різних режимах функціонування оптичного тракту.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- кількість каналів передавання у волоконно-оптичній системі доступу – 64;
- ширина смуги групового сигналу – 8192 МГц;
- частотний інтервал між підносійними – 128 МГц;
- центральна довжина хвилі робочого діапазону системи передавання – 1550 нм;
- довжина стандартного одномодового оптичного волокна SSMF – 20 км;
- формат модуляції оптичного сигналу - 256-QAM;

- тип завадостійкого кодування лінійного сигналу – Ріда Соломона;
- коефіцієнт бітових помилок – 10^{-12} ;
- значення Q-фактору – 8,5 дБ;
- глибина оптичної модуляції канального сигналу – 0,04;
- тип мультиплексування каналів передавання – частотне;
- тип ущільнення в каналі передавання – OFDM.

Запропоновані методики розрахунку показників якості сигналів дозволять забезпечити єдиний підхід до проектування, обслуговування та експлуатації обладнання оптичних мереж з частотним поділом каналів, що в свою чергу призведе до уніфікації обладнання та підвищенню якості обслуговування користувачів мережі.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	02.09.2019р.	06.09.2019р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки (ТЕО)	09.09.2019р.	13.09.2019р.	Розроблене ТЕО	Вступ. Розділ 1.
3.	Сучасний стан і перспективи розвитку частотного поділу каналів у ВОСП	16.09.2019р.	04.10.2019р.	Проведений аналіз	Розділ 2
4.	Пряме фотодетектування оптичних сигналів із частотним розподілом каналів	07.10.2019р.	25.10.2019р.	Розроблений метод	Розділ 3
5.	Приклади волоконно-оптичних мереж доступу з частотним розділенням каналів	28.10.2019р.	08.11.2019р.	Характеристики і параметри	Розділ 4

6.	Аналіз економічної ефективності	11.11.2019р.	15.11.2019р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.11.2019р.	22.11.2019р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	25.11.2019р.	29.11.2019р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, рецензування МКР	02.12. 2019р.	06.12.2019р.	Позитивні відзиви	Відзив. рецензія
10.	Захист МКР ЕК		09.12. 2019р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- дуплексна система передачі із застосуванням частотного поділу підносійних каналів;
- структурна схема кільцевої волоконно-оптичної опорної мережі доступу;
- структурна схема одноволоконної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів;
- структурна схема центральної станції волоконно-оптичної мережі доступу;
- структурна схема високонадійної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів;
- структурна схема кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів за запитами;
- структурна схема вузла комутації мережі доступу;
- структурна схема FDM-PON-мережі;
- блок-схема трансиверів оптичної мережі доступу;

- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання розробленого структурної схеми FDM-PON-мережі.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій:

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження структурної схеми FDM-PON-мережі;

- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження схеми кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів за запитами.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується уніфікація обладнання та підвищення якості обслуговування користувачів мережі доступу.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

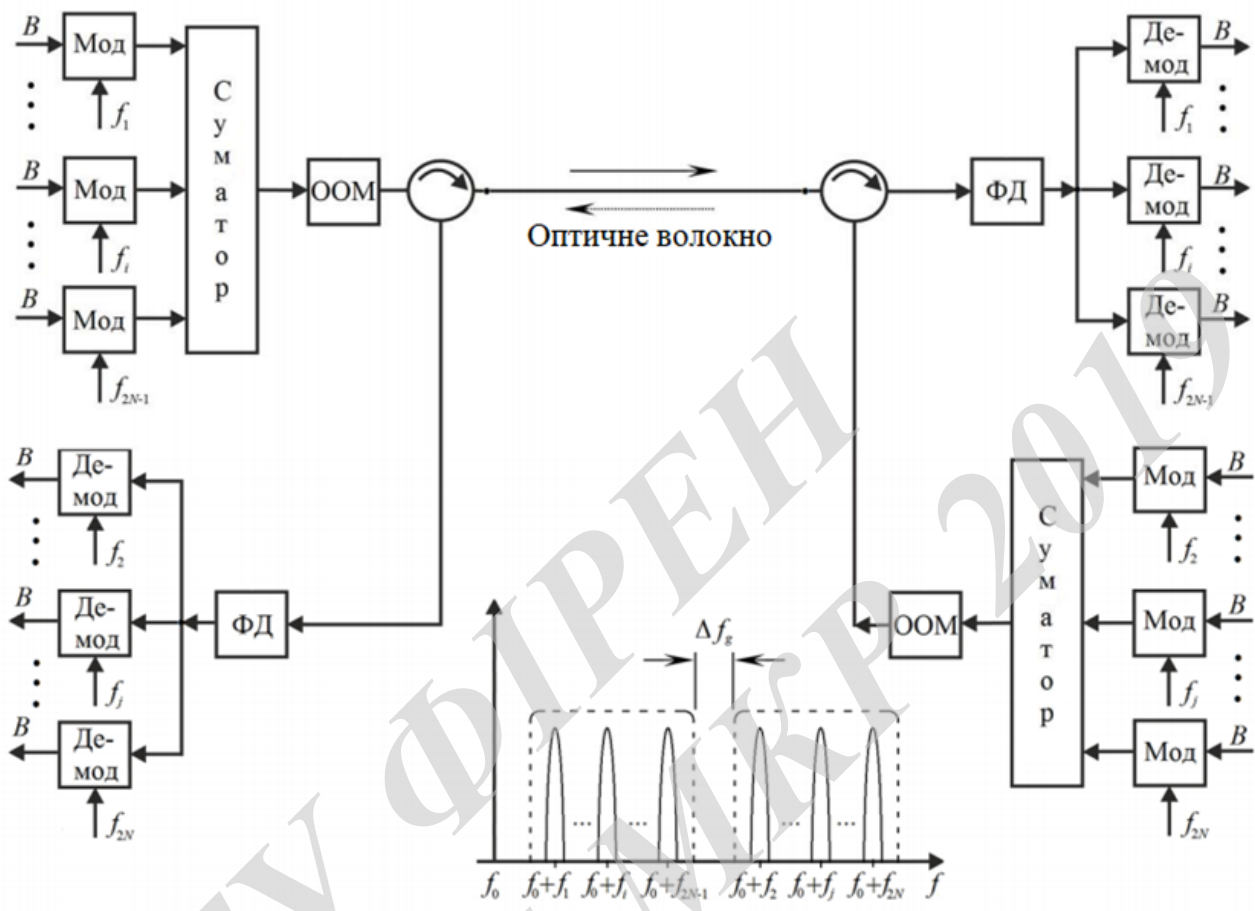
10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

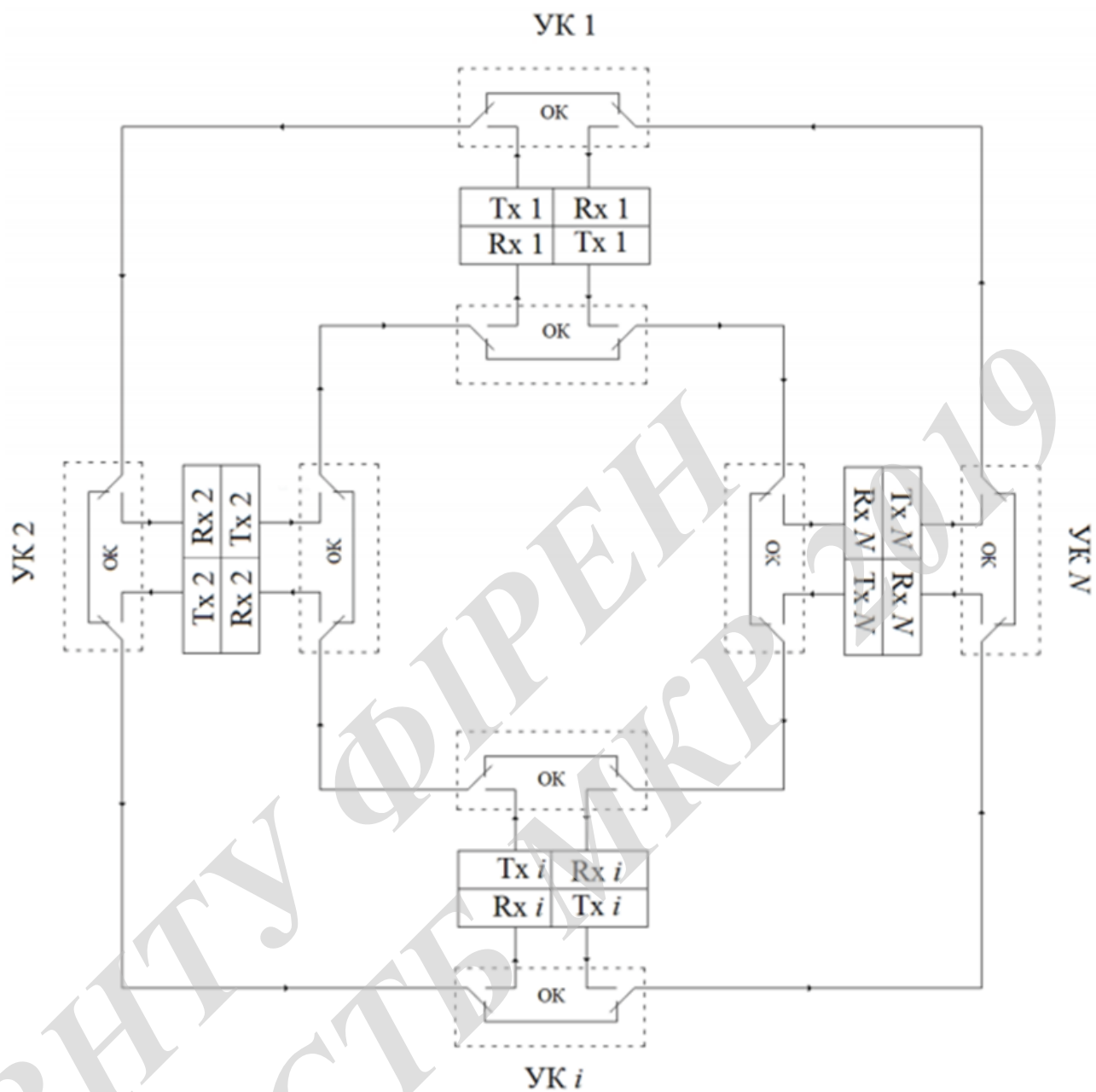
- техніко-економічне обґрунтування розробки;
- дуплексну систему передачі із застосуванням частотного поділу підносійних каналів;
- структурну схему кільцевої волоконно-оптичної опорної мережі доступу;
- структурну схему одноволоконної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів;
- структурну схему центральної станції волоконно-оптичної мережі доступу;
- структурну схему високонадійної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів;
- структурну схему кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів за запитами;
- структурну схему вузла комутації мережі доступу;
- структурну схему FDM-PON-мережі;
- блок-схему трансиверів оптичної мережі доступу;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання інфокомунікаційної мережі доступу.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

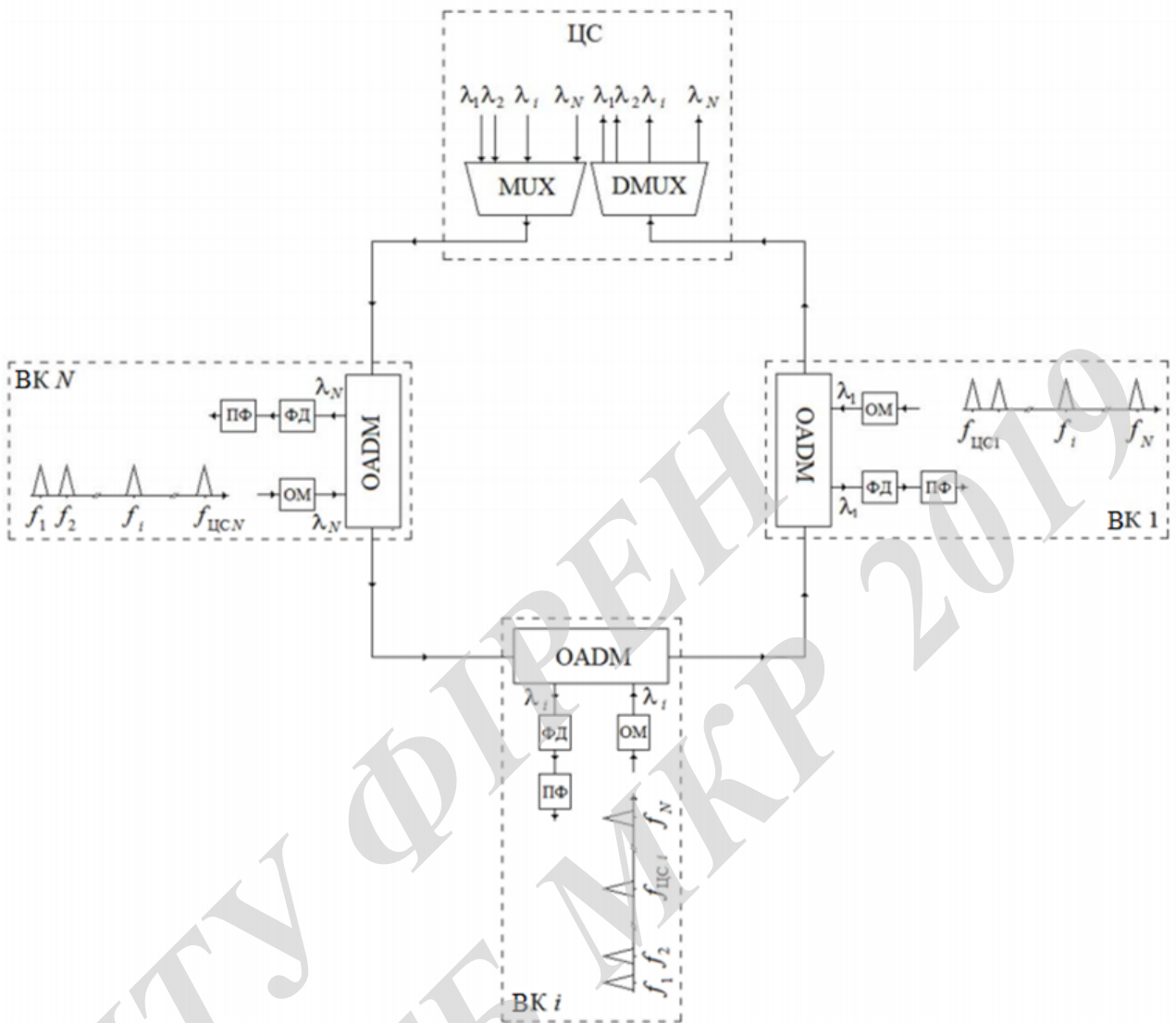
У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.



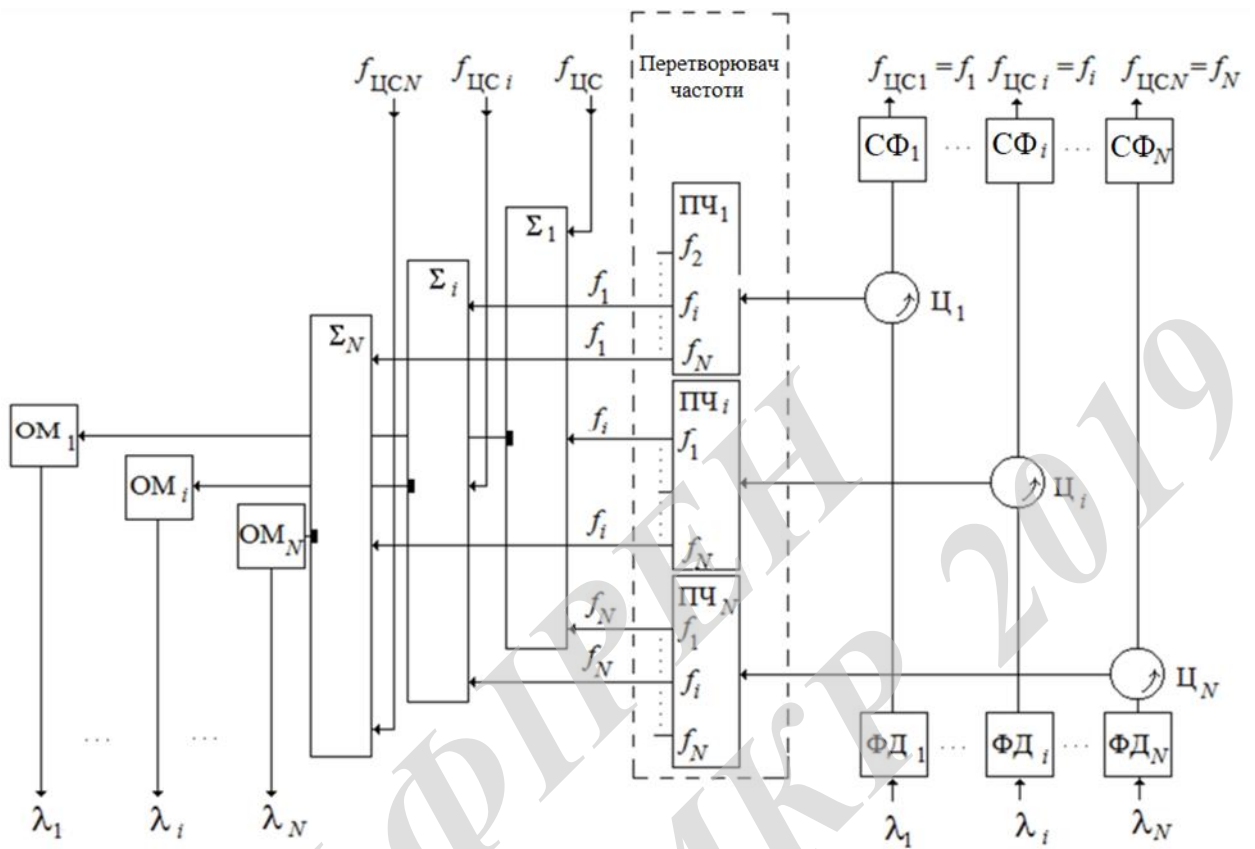
					08-34. МКР.007.00.000 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Миронов А.Г.			Дуплексна система передачі із застосуванням частотного поділу підносійних каналів	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Городецька О.С.					1	1
Реценз.		Білинський Й.Й.				ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Городецька О.С.						
Затверд.		Бортник Г.Г.						



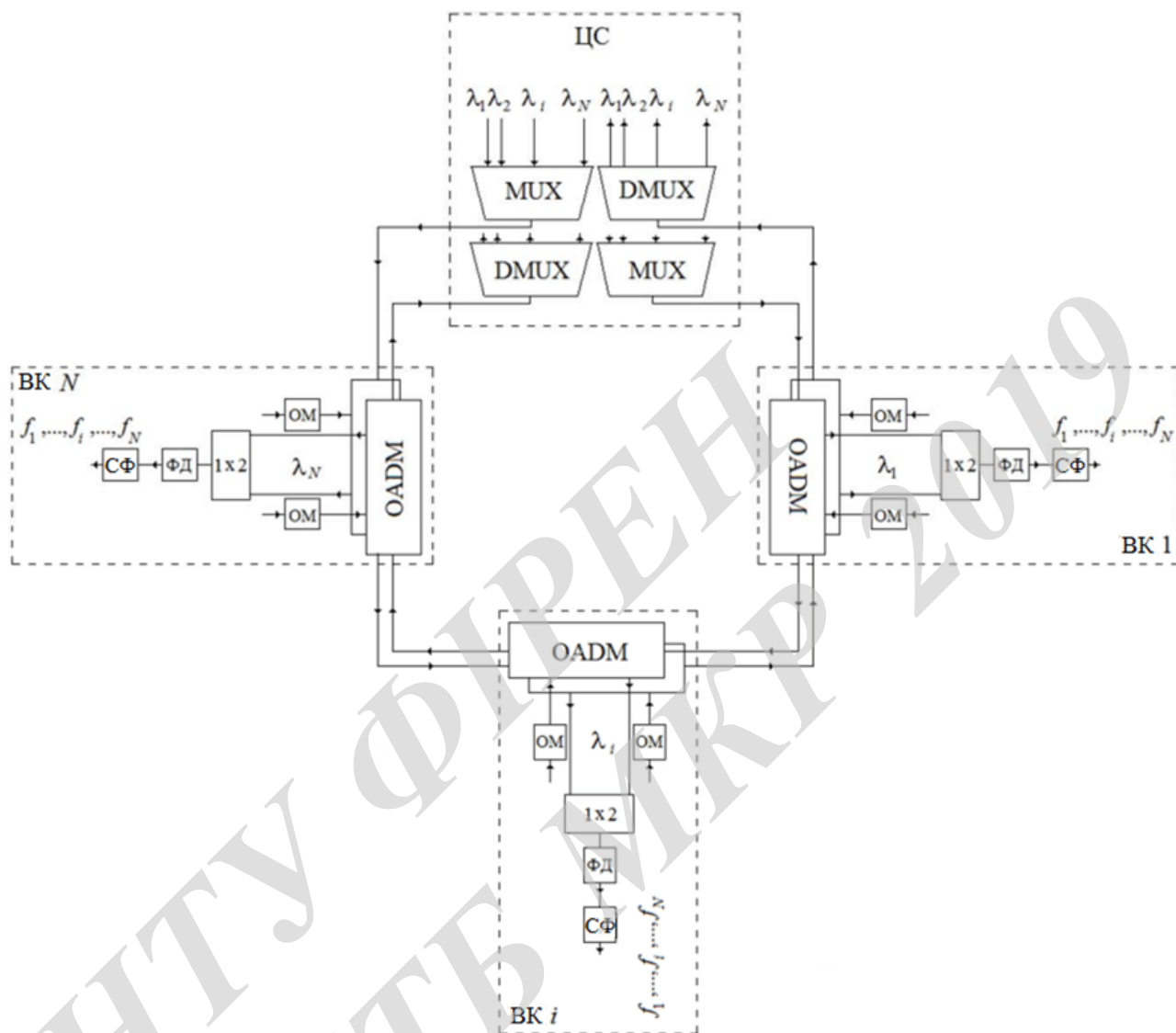
					08-34. МКР.007.00.000 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структурна схема кільцевої волоконно-оптичної опорної мережі доступу					
Розроб.	Миронов А.Г.							Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Городецька О.С.								1	1
Реценз.	Білинський Й.Й.							ВНТУ, гр. ТКС-18М		
Н. Контр.	Городецька О.С.									
Затверд.	Бортник Г.Г.									



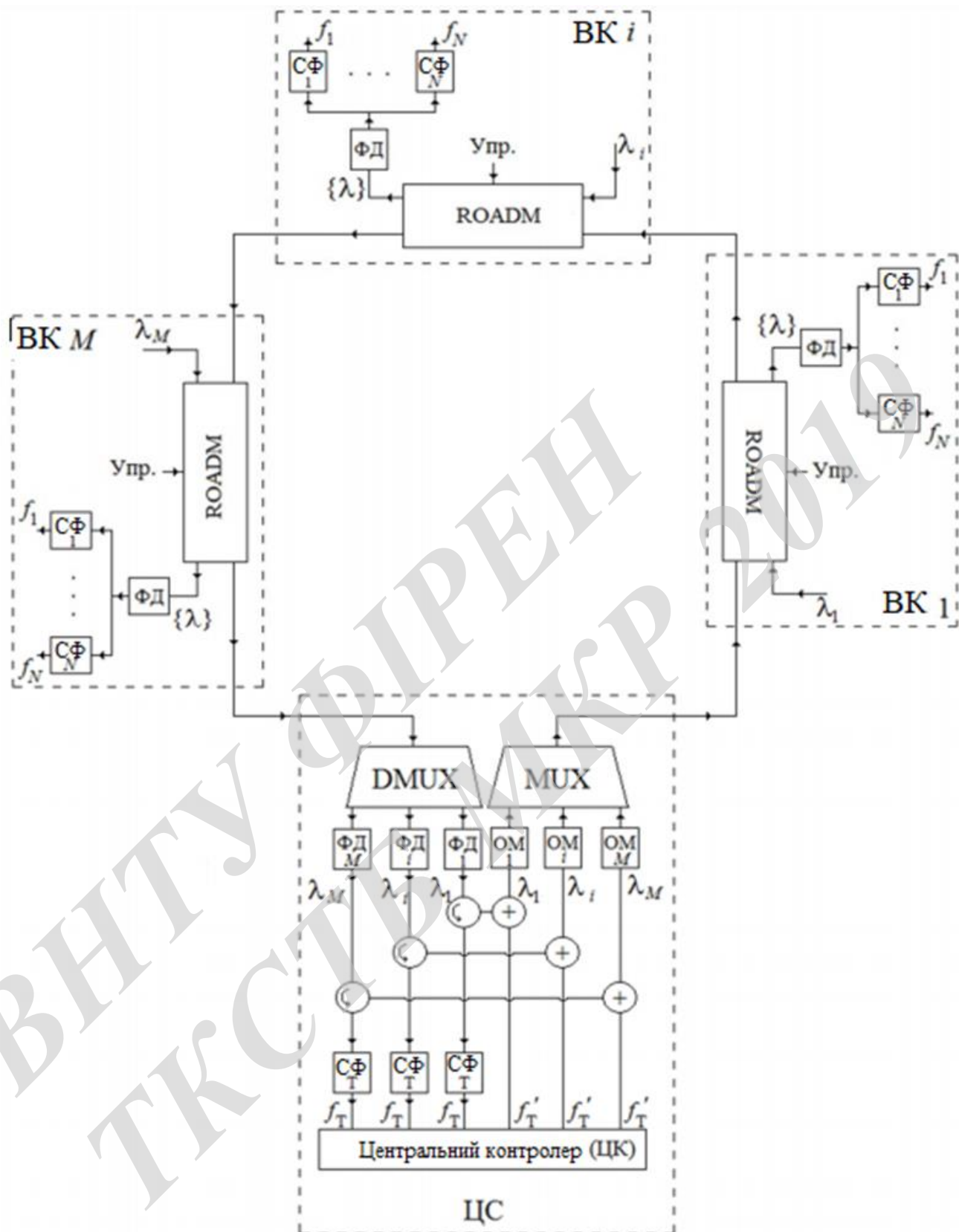
					08-34. МКР.007.00.000 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Миронов А.Г.				Структурна схема одноволоконної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Городецька О.С.						1	1
Реценз.	Білинський Й.Й.					ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.	Городецька О.С.							
Затверд.	Бортник Г.Г.							



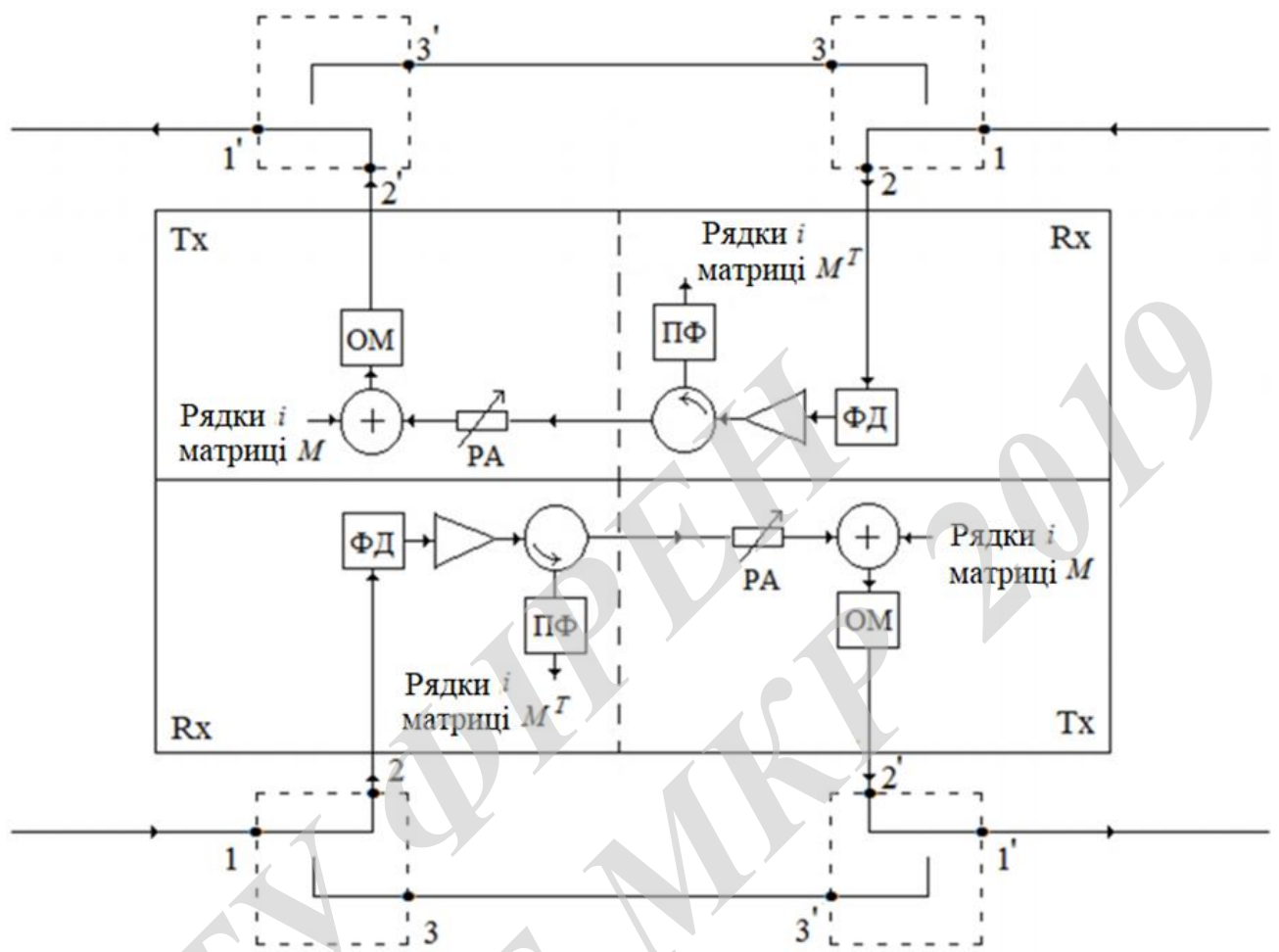
					08-34. МКР.007.00.000 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структурна схема центральної станції волоконно-оптичної мережі доступу		
Розроб.	Миронов А.Г.						
Перевір.	Городецька О.С.						
Реценз.	Білинський Й.Й.						
Н. Контр.	Городецька О.С.						
Затверд.	Бортник Г.Г.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
						1	1
					ВНТУ, гр. ТКС-18м		



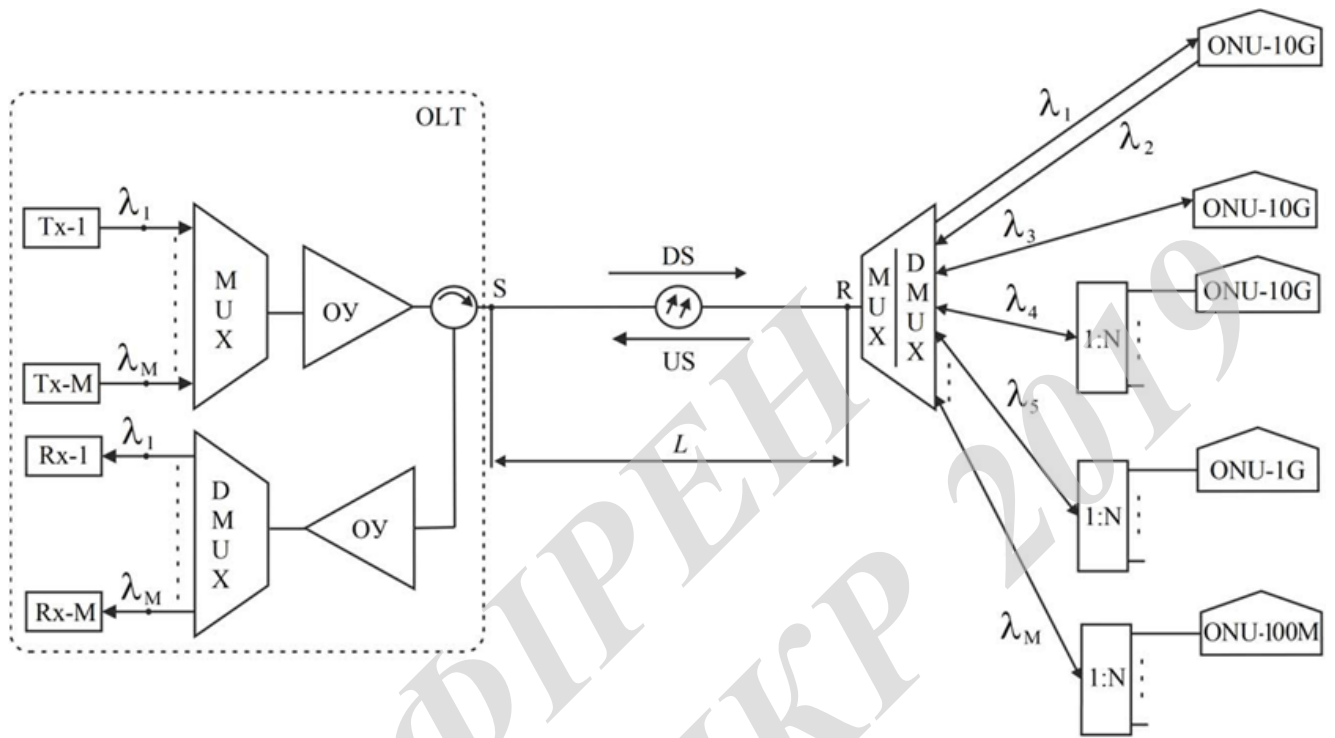
					08-34. МКР.007.00.000 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Миронов А.Г.				Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Городецька О.С.					1	1
Реценз.	Білинський Й.Й.				ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.	Городецька О.С.						
Затверд.	Бортник Г.Г.						
					Структурна схема високошвидкісної кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів		



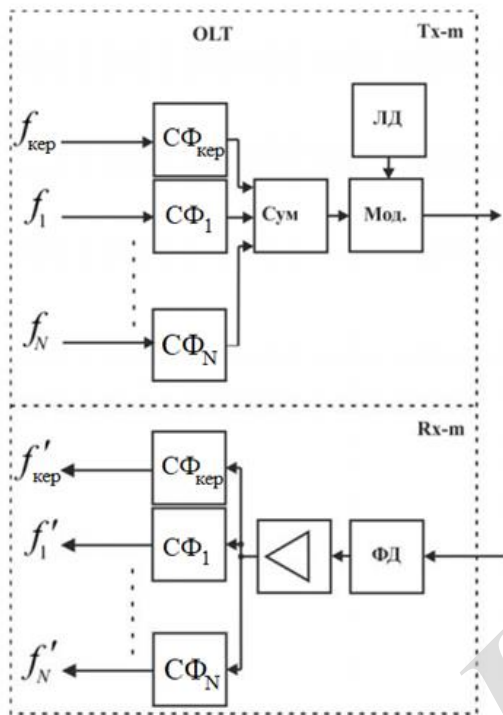
					08-34. МКР.007.00.000 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Миронов А.Г.				Структурна схема кільцевої мережі з комутацією підносійних каналів за запитами	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Городецька О.С.						1	1
Реценз.	Білинський Й.Й.					ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.	Городецька О.С.							
Затверд.	Бортник Г.Г.							



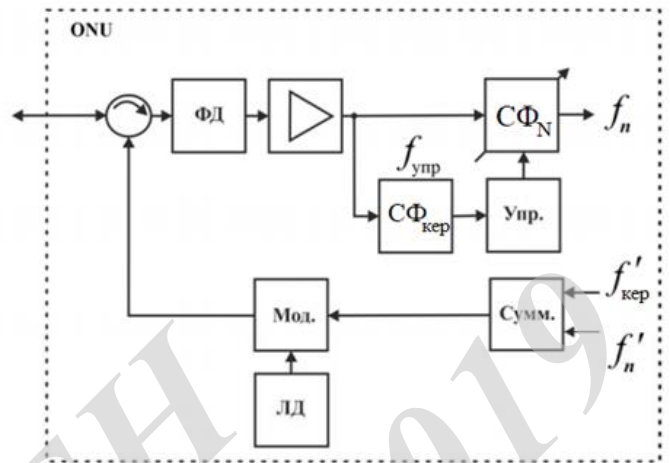
					08-34. МКР.007.00.000 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Миронов А.Г.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Городецька О.С.				1	1
Реценз.		Білинський Й.Й.			ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.		Городецька О.С.					
Затверд.		Бортник Г.Г.					
Структурна схема вузла комутації мережі доступу							



					08-34. МКР.007.00.000 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структурна схема FDM-PON-мережі					
Розроб.	Миронов А.Г.							Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Городецька О.С.								1	1
Реценз.	Білинський Й.Й.							ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.	Городецька О.С.									
Затверд.	Бортник Г.Г.									



а)



б)

					08-34. МКР.007.00.000 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Миронов А.Г.				Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Городецька О.С.					1	1
Реценз.	Білинський Й.Й.				ВНТУ, гр. ТКС-18м		
Н. Контр.	Городецька О.С.						
Затверд.	Бортник Г.Г.						