

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА  
ІНФОРМАТИЗАЦІЇ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК  
ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ  
«ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МЕРЕЖІ»**

**СЕРИХ С. О. ГАЙДУР Г. І.**

**НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ АБОНЕНТСЬКИХ ЛІНІЙ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ  
xDSL**

**МОДУЛЬ 4**

**КИЇВ - 2013**

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА  
ІНФОРМАТИЗАЦІЇ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК  
ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ  
«ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МЕРЕЖІ»**

**СЕРИХ С. О. ГАЙДУР Г. І. ІЛЬІН О.О.**

**НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ АБОНЕНТСЬКИХ ЛІНІЙ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ  
xDSL  
МОДУЛЬ 4**

**Затверджено вченою радою  
Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів за напрямом  
«Телекомунікації»**

**КИЇВ - 2013**

УДК 621.391.13 Гриф надано  
навчально-науковим інститутом  
Телекомунікацій та інформатизації ДУІКТ  
(протокол № від 2009 р.)

Рецензенти: проф., д.т.н. Лучук А.М., проф., д.т.н. Смирнов В.С.

Навчальний посібник призначений для самостійної роботи студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за кредитно-модульною системою, з навчальної дисципліни “Телекомунікаційні та інформаційні мережі” (ТІМ) - циклу дисциплін професійної та практичної підготовки за напрямом 0924 “ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ”.

Навчальна дисципліна “ Телекомунікаційні та інформаційні мережі ” вивчається протягом двох семестрів. Матеріал відповідає програмі дисципліни, сформований у відповідності до четвертого модулю:

**Серих С. О., Гайдур Г. І.**

**Напрямки вдосконалення абонентських ліній телекомунікаційних мереж з використанням технології xDSL**

У навчальному посібнику розглянуто базові принципи побудови мереж на базі технологій xDSL. Представлено функціональні схеми побудови абонентських ліній xDSL та їх різноманітні варіанти .

Розглянуто різні методи кодування в технології xDSL, завдяки чому підвищується швидкість передачі та пропускна здатність мережі.

Навчальний посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальностями з напрямку “Телекомунікації”, а також може бути корисний для аспірантів, викладачів навчальних закладів відповідних спеціальностей, фахівців, які обслуговують телекомунікаційні мережі зв'язку.

## ЗМІСТ

	<b>ПЕРЕДМОВА</b>	<b>10</b>
<b>Розділ 1.</b>	<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ xDSL</b>	<b>11</b>
1.1	Що таке технологія xDSL?	11
1.2	Різні типи технологій та аналіз їхньої роботи	16
1.3	Типи кодування у сімействі технологій xDSL	17
<b>Розділ 2.</b>	<b>ФАКТОРИ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ З'ЄДНАНЬ DSL</b>	<b>19</b>
2.1	Базові параметри абонентних кабелів	20
2.2	Спеціалізовані параметри кабелю	21
<b>Розділ 3.</b>	<b>ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОДУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ xDSL</b>	<b>24</b>
3.1	Кодування 2B1Q	24
3.2	Кодування CAP	27
3.3	Кодування QAM	33
3.4	Метод кодування DMT	40
	<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>44</b>
	Контрольні запитання для самооцінки рівня знань	44
	Список літератури, рекомендованої для поглибленого вивчення матеріалу	45

## **ПЕРЕДМОВА**

Навчальний посібник призначений для вивчення дисципліни “Телекомунікаційні та інформаційні мережі” (ТІМ) з циклу дисциплін професійної та практичної підготовки для студентів вищих навчальних закладів усіх форм навчання за напрямом 0594 “ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ”.

Навчальний посібник підготовлено для роботи за кредитно-модульною системою, відповідно до програми дисципліни ТЕЗ.

Посібник призначено для студентів, які вивчають методи доступу до мереж з використанням технології xDSL. Робота з навчальним посібником не виключає використання інших підручників та посібників.

### **Предметом навчальної дисципліни є:**

- телекомунікаційні та інформаційні мережі, мережні технології, концепції реальних мереж, принципи побудови перспективних високошвидкісних мереж та напрямки їх розвитку, методи оптимального синтезу та аналізу мереж.

### **Метою вивчення навчальної дисципліни є:**

-формування базових знань, необхідних для розуміння широкого кола реальних проблем у сфері телекомунікації; вивчення загальних принципів побудови телекомунікаційних та інформаційних мереж, принципів їх функціонування на базі різноманітних мережних технологій; вивчення концепцій існуючих мереж зв'язку; напрямки розвитку перспективних мереж та мережних технологій.

### **Завданнями навчальної дисципліни є формування наступних умінь:**

#### **Модуль 1**

Уміти аналізувати архітектуру та роботу сучасних телекомунікаційних мереж та систем.

Уміти виконувати розрахунки основних показників телекомунікаційних мереж, а також, оцінювати можливість їх використовувати в нових телекомунікаційних мережах.

Уміти складати технічне завдання проекту мережі доступу та аналізувати потреби і характеристики послуг які вона забезпечує.

Уміти аналізувати та проводити дослідження кількісних та якісних показників мереж і мережних об'єктів за заданими початковими даними.

#### **Модуль 2**

Уміти виконувати моделювання, синтез та оптимізацію нових мереж і мережних об'єктів.

Уміти розробляти технічне завдання на проектування мережних об'єктів за розділами, складати структурні схеми мережі доступу міст, виконувати розрахунки потоків.

Уміти виконувати під керівництвом провідного фахівця основні проектні роботи для телекомунікаційних мереж.

#### **Модуль 3**

Уміти орієнтуватись в можливостях, особливостях та напрямках розвитку сучасних високошвидкісних технологій; у варіантах побудови мереж за сферами їх застосування.

Уміти проводити дослідження кількісних і якісних характеристик мережі доступу та її основних економічних показників.

#### **Модуль 4**

Уміти розподіляти за призначенням, технічними можливостями, якістю надання послуг і особливостями застосування кабельні технології та технології, що використовують системи з радіодоступом.

## Розділ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ xDSL

### 1.1 Що таке технологія DSL?

Скорочення DSL розшифровується як Digital Subscriber Line (цифрова абонентська лінія). DSL є досить новою технологією, що дозволяє значно розширити смугу пропускання старих мідних телефонних ліній, що з'єднують телефонні станції з індивідуальними абонентами. Будь-який абонент, що користується в даний момент звичайним телефонним зв'язком, має можливість за допомогою технології DSL значно збільшити швидкість свого з'єднання, наприклад, з мережею Інтернет. Варто пам'ятати, що для організації лінії DSL використовуються саме існуючі телефонні лінії; перевага даної технології у тому, що вона не вимагає прокладання додаткових телефонних кабелів. У результаті ви одержуєте цілодобовий доступ до мережі Інтернет зі збереженням нормальної роботи звичайного телефонного зв'язку. Ніхто з ваших друзів більше не поскаржиться, що годинами не може до вас додзвонитися. Завдяки різноманіттю технологій DSL користувач може вибрати підходящу саме йому швидкість передачі даних — від 32 Кбіт/с до більш ніж 50 Мбіт/с. Дані технології дозволяють також використовувати звичайну телефонну лінію для таких широкосмугових систем, як: відео за запитом або дистанційне навчання. Сучасні технології DSL дають можливість організації високошвидкісного доступу в Інтернет у кожному будинку або кожному підприємстві середнього й малого бізнесу, перетворюючи звичайні телефонні кабелі у високошвидкісні цифрові канали. Причому, швидкість передачі даних залежить тільки від якості й довжини лінії, що з'єднують користувача й провайдера. При цьому, провайдери звичайно дають можливість користувачеві самостійно вибрати швидкість передачі, найбільш відповідну його індивідуальним потребам [1].

Для кінцевих користувачів технології DSL забезпечується високошвидкісне й надійне з'єднання між мережами або з мережею Інтернет, а телефонні компанії отримують можливість виключити потоки даних зі свого комутаційного устаткування, залишаючи його винятково для традиційного телефонного зв'язку.

Забезпечення високошвидкісної передачі даних по мідній двопровідній абонентській телефонній лінії досягається встановленням устаткування DSL на абонентському кінці лінії й на «кінцевій зупинці» магістральної мережі високошвидкісної передачі даних, що перебуває на телефонній станції, до якої підключена дана абонентська лінія. Якщо на абонентській лінії з використанням технології DSL організована високошвидкісна передача даних, інформація передається у вигляді цифрових сигналів у смузі більш високих частот, ніж та, котра звичайно використовується для традиційного аналогового телефонного зв'язку. Це дозволяє значно розширити комунікаційні можливості існуючих кручених пар телефонних проводів.

Використання технологій DSL на абонентській телефонній лінії дозволило перетворити абонентську кабельну мережу в частину мережі високошвидкісної передачі даних. Телефонні компанії отримали можливість збільшити свої прибутки, використовуючи існуючу кабельну телефонну мережу для надання своїм абонентам можливості високошвидкісної передачі даних за доступною ціною.

Крім забезпечення високошвидкісної передачі даних, технологія DSL є ефективним засобом організації багатоканальних служб телефонного зв'язку. За допомогою технології VoDSL (голос по DSL) можна об'єднати велику кількість каналів телефонного (голосового) зв'язку й передати їх по одній абонентській лінії, на якій встановлене устаткування DSL.

Зазвичай, багатоканальні служби телефонного зв'язку організовуються з використанням технології тимчасового розподілу каналів. У таких системах існує чітке закріплення каналів і, якщо який-небудь із каналів не використовується, смуга частот, відведена для роботи даного каналу, не може бути використана для передачі даних. Технологія VoDSL дозволяє реалізувати передачу даних голосової служби на базі однієї мідної лінії. Виходить, що та ж сама лінія, що звичайно забезпечує один канал голосового зв'язку, може забезпечити роботу набагато більшої кількості телефонних каналів і, на додаток до цього, високошвидкісну передачу даних. Доречі,

дану технологію можна використати й тоді, коли на телефонній станції є вільна номерна ємність, а деяким абонентам необхідно забезпечити телефонний зв'язок. Прокладати новий кабель до цих абонентів досить дорого, але якщо є хоча б одна вільна пара проводів, її можна використати для організації потрібної кількості телефонних каналів.

Більше того, широкопasmові мережі, побудовані на базі технології DSL, не обмежені тільки організацією багатоканального голосового зв'язку або високошвидкісною передачею даних. Вони являють собою базову мережу для впровадження інших служб, що неодмінно вимагають для своєї роботи використання широкої смуги частот.

Забезпечення доступу в мережу Інтернет є однією з основних функцій сучасних цифрових мереж. Ширина використовуваної смуги частот залежить від застосованої технології високошвидкісної передачі даних.

Організація відеоконференцій вимагає симетричної передачі даних. Тому що, при організації відеоконференцій необхідно передавати голосовий і відео сигнали, тож така служба вимагає найбільш широкої частотної смуги в порівнянні з іншими службами. При цьому мінімальна затримка передачі або втрата частини інформації можуть бути негайно виявлені.

Організація служби відео за запитом вимагає встановлення асиметричного з'єднання. Вихідний потік передачі даних (від користувача до мережі) використовується для передачі користувачем сигналів керування (таких як: відтворення, зупинка, пауза, перемотування й т.п.). Спадний потік передачі даних використовується для передачі користувачеві вхідного відеосигналу.

Мережні ігри зазвичай вимагають використання не дуже великої смуги частот (звичайно це залежить від використовуваної гри), але висувають досить жорсткі вимоги до часу затримки. При цьому, дуже часто всі операції, необхідні для ведення гри, виконуються на комп'ютері одного з користувачів, а між мережею й іншими учасниками передається тільки та інформація, що стосується саме цих учасників.

Для забезпечення можливості організації нових служб мережа абонентських двопровідних телефонних ліній повинна пройти певний етап розвитку від аналогової вузькопasmової мережі, призначеної для передачі тільки телефонних розмов, до цифрової широкопasmової мережі, призначеної не тільки для передачі голосу, але й для передачі даних і відеосигналів [2].

Традиційна аналогова мережа абонентських ліній дозволяє передавати аналогові сигнали між абонентами й комутаційним устаткуванням телефонних станцій, що входять до складу комутаційної телефонної мережі загального користування. Дана мережа оптимізована для передачі сигналів голосу й має обмежену смугу пропускання (Рисунок 1.1).

Зі сторони абонента сигнали голосу передаються в лінію як стандартні аналогові сигнали традиційного телефонного зв'язку. Дані подаються в ту ж саму лінію через модем DSL, що дозволяє передавати їх у вигляді високочастотних цифрових сигналів. Ці сигнали передаються від абонента до устаткування, встановленого на телефонній станції.

На телефонній станції сигнали проходять через спліттер й устаткування, що дозволяє забезпечити контроль і керування використанням абонентської лінії, і потім потрапляють на мультиплексор доступу цифрової абонентської лінії (DSLAM). Спліттер являє собою фільтр, що виділяє сигнали звичайного телефонного зв'язку й направляє їх на комутаційне устаткування телефонної станції. Високочастотні цифрові сигнали направляються на мультиплексор доступу, що поєднує трафік великої кількості абонентських телефонних ліній. Устаткування керування й контролю абонентської лінії може встановлюватися як перед спліттером, так і після нього. Воно забезпечує захист комутаційного устаткування, фізичний доступ, тестування телефонного устаткування й тестування широкопasmового цифрового устаткування, що необхідно для організації даної системи, її обслуговування, пошуку й усунення несправностей. З мультиплексора доступу трафік подається на маршрутизатор, що направляє його до мережі Інтернет.

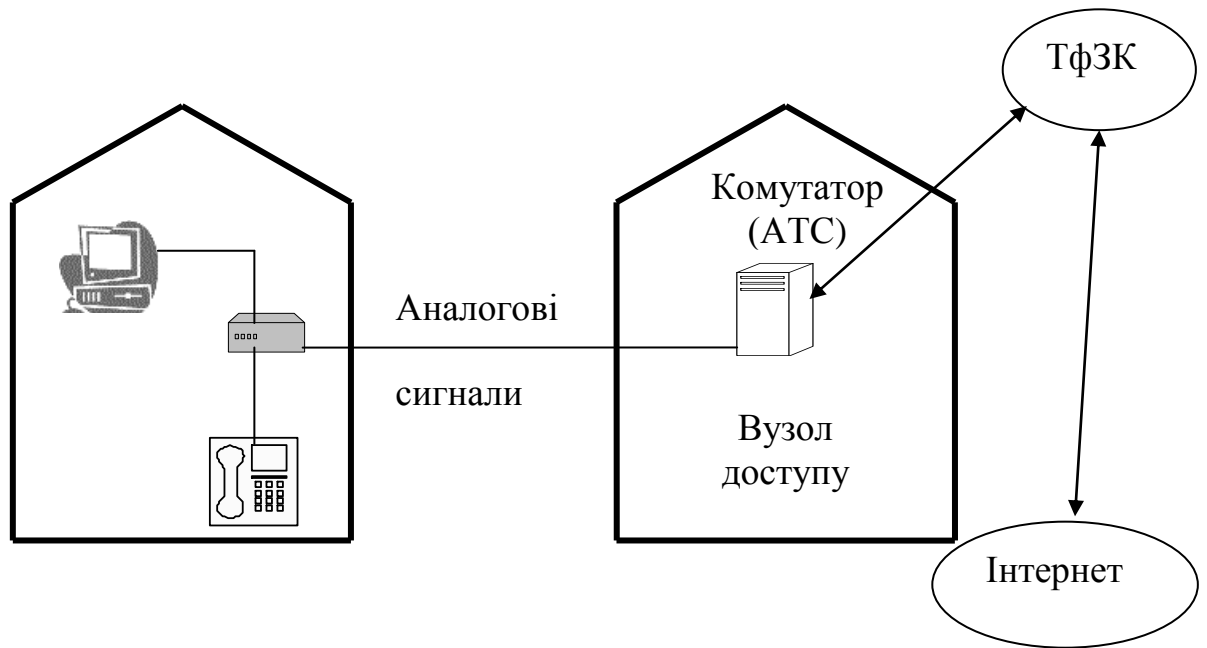


Рисунок 1.1 – Організація абонентських ліній на телефонній мережі

Для організації на одній абонентській лінії декількох каналів телефонного зв'язку й каналу високошвидкісної передачі даних у мережу повинно бути інтегроване додаткове устаткування (рисунок 1.2).

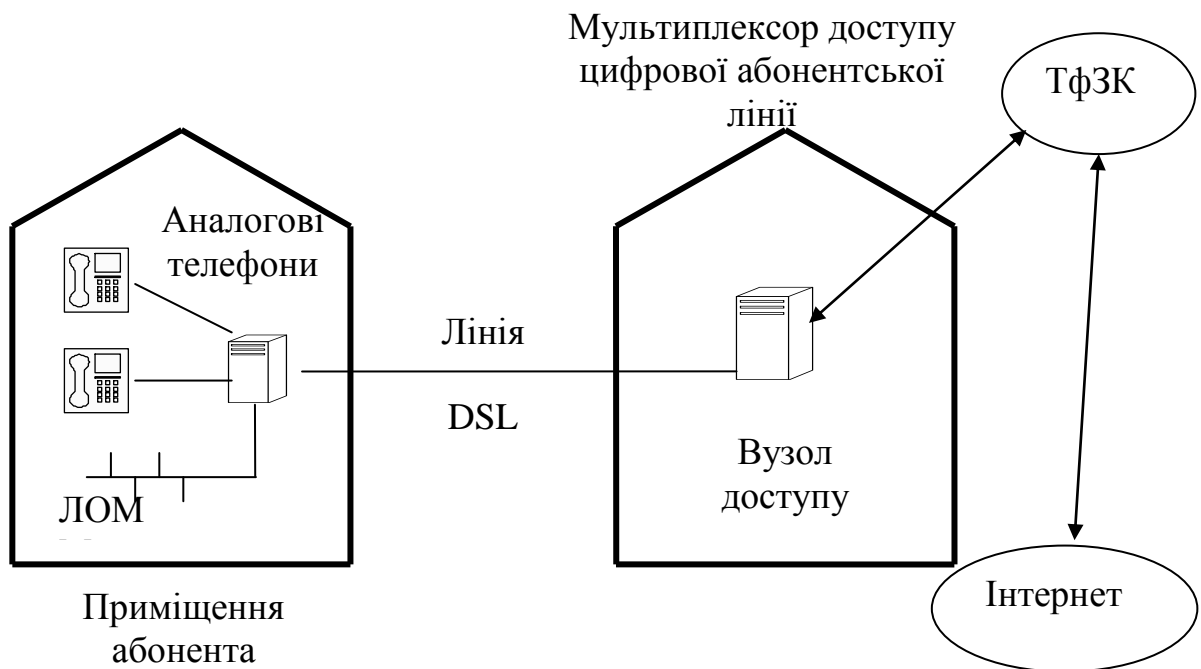


Рисунок 1.2 - Організація на одній абонентській лінії декількох каналів телефонного зв'язку

На абонентській стороні, лінії, що йдуть від телефонних апаратів й, наприклад, комп'ютерів, підключаються до пристрою інтегрованого доступу, що дозволяє перетворити аналоговий сигнал телефонного зв'язку в цифрову форму, об'єднати його з даними, що



надходять від комп'ютерів, і все це передати у вигляді цифрового високочастотного сигналу на телефонну станцію [8].

На телефонній станції сигнал проходить через устаткування, що дозволяє забезпечити контроль і керування використанням абонентської лінії, і потрапляє на мультиплексор доступу цифрової абонентської лінії. Мультиплексор доступу цифрової абонентської лінії поєднує трафік великої кількості абонентських телефонних ліній. З мультиплексора доступу дані у вигляді пакетів передаються в мережу Інтернет і надходять за призначенням.

У цифровій мережі абонентських ліній характеристики трафіку, переданого між абонентом і комутаційною станцією, відрізняються від характеристик вузькосмугової аналогової абонентської мережі. Трафік передається в спектрі найбільш високих частот і займає значно ширшу частотну смугу. Інформація, що стосується до різних служб, наприклад, багатоканального телефонного зв'язку, високошвидкісної передачі даних або передачі відеосигналу, передається у вигляді цифрового сигналу. Для ефективного керування такою мережею телефонним компаніям (провайдерам) необхідні нові засоби й зовсім нові стратегії керування мережею.

Поступовий перехід від аналогової абонентської телефонної лінії до цифрової абонентської лінії утворює кілька нових аспектів керування.

Насамперед, це - прискорення введення системи в дію і її обслуговування. Постійна потреба у високошвидкісній передачі даних привела до створення технологій і відповідного устаткування DSL. Для забезпечення належного рівня обслуговування, наприклад, у містах, устаткування доступу повинно встановлюватись на сотнях телефонних станцій. Тільки після встановлення необхідного устаткування можна пропонувати дану послугу потенційним користувачам. Надання абонентам послуги високошвидкісної передачі даних містить у собі встановлення необхідного устаткування в абонента, правильне підключення й підготовку лінії, що з'єднує устаткування користувача з тим устаткуванням, що встановлено на телефонній станції та початок обслуговування. При цьому існує потреба в підготовці кадрів, що володіють умінням працювати з устаткуванням і технологіями DSL, для всіх організацій, що беруть участь у наданні даної послуги. Час, який техніки затратять на переміщення між станцією й абонентом для встановлення устаткування й підготовку лінії, може затримати початок обслуговування абонента, а для провайдера — затримати одержання прибутку й налагодження досить дохідної служби. Час, що йде на підготовку фізичних ліній, тобто на їхнє тестування й ремонт, також сповільнює надання даної послуги. Значно знизити витрати й прискорити строки надання послуги дозволить використання устаткування, що забезпечує автоматичне тестування ліній й усунення на них всіх виявлених ушкоджень.

Технології DSL передбачають передачу високочастотного сигналу по абонентській кабельній мережі, що складається з мідних двопровідних фізичних ліній, що, як вже зазначалося вище, оптимізовано для передачі низькочастотних аналогових сигналів. Тому необхідно мати прилади, що дозволяють аналізувати характеристики лінії саме в області високих частот і шукати не тільки явні несправності, але й ті несправності, які впливають саме на високошвидкісну передачу даних. Не всі лінії підтримують технології DSL.

Технічні фахівці телефонних компаній повинні вміти кваліфікувати лінії не тільки з погляду можливості їхнього використання для високошвидкісної передачі даних з використанням технології DSL, але й для визначення конкретної технології DSL, що може використатися на даній абонентській лінії. Ідеально, якщо перевірка ліній потенційних користувачів буде проведена заздалегідь, що дозволить після надходження від кожного із цих користувачів запиту на обслуговування практично без затримки надати йому необхідну послугу.

Провайдери повинні мати фізичний доступ до абонентських ліній і перевіряти устаткування, що дозволяє дистанційно аналізувати цифрові високочастотні сигнали й стан фізичної лінії, що дозволить контролювати роботу абонентської лінії, шукати й усувати несправності, що з'являються.

При використанні стандартної аналогової телефонної служби абонент набирає номер, що дозволяє комутаційному устаткуванню телефонної мережі встановити з'єднання з іншим абонентом або модемом. У випадку несправності, наприклад, модему провайдера, відбувається роз'єднання і, для встановлення з'єднання, абонент повинен знову набрати телефонний номер. З'єднання DSL є постійно включеним з'єднанням, що з'єднує устаткування користувача з мультиплексором доступу. У випадку пошкодження на станції устаткування, що забезпечує з'єднання з даним користувачем, останній не буде одержувати обслуговування до усунення провайдером несправності у своєму устаткуванні. Тому, на випадок пошкодження устаткування забезпечення доступу, провайдер повинен мати можливість швидко перемкнути користувача на резервне устаткування й усунути несправність.

Гонка надання послуг нового покоління по абонентській телефонній лінії почалася. Провайдери вкладають кошти в технології DSL, що дозволяє значно розширити смугу пропускання абонентських ліній і передавати по цих лініях не тільки високошвидкісні потоки даних, але й відеосигнали [3]. Для успішного розгортання й керування новими ширококуговими цифровими абонентськими лініями необхідні устаткування й прилади, що дозволяють дистанційно кваліфікувати абонентську телефонну лінію з огляду перевірки її здатності підтримувати роботу технології DSL, забезпечити фізичний доступ до абонентської лінії й аналіз високочастотних сигналів з пошуком несправностей та ізолюванням пошкоджень, дають можливість перемикання фізичної лінії абонента на інше устаткування у випадку несправності устаткування доступу, а також, забезпечують можливість перемикання фізичної лінії абонента при зміні обслуговування.

Існуюча на даний момент ситуація з пошуком й усуненням несправностей за допомогою того устаткування, що призначено для роботи на аналогових вузькосмугових телефонних лініях, не відповідає потребам сучасних провайдерів, основне завдання яких полягає у швидкому розгортанні ширококугової мережі цифрових абонентських ліній й ефективному керуванні цією мережею.

У міру того, як мережі стають все більш складними з огляду наданих послуг і виконуваних функцій, системи керування також повинні розвиватися. Удосконалені засоби й інструменти керування знижують загальні витрати на контроль стану мережі й керування. Такі операції, як: контроль частотного спектра кабельної мережі для визначення її сумісності з технологією DSL, а також, визначення рівня помилок для конкретного з'єднання, можуть бути автоматизовані.

Забезпечення спектральної сумісності є дуже важливим завданням для підтримки працездатності служб, що базуються на технології DSL. У міру зростання кількості кабелів, використовуваних для високошвидкісної передачі даних за технологією DSL, зростає й рівень завад. Лінії, використовувані іншими системами передачі, а також, зовнішні джерела завад, такі як радіопередавачі, а також інші джерела радіочастотних завад, можуть знизити відношення сигнал-шум окремих ліній DSL. Тестування рівнів завад на кабельній мережі на постійній або регулярній основі є дуже важливим фактором запобігання появи пошкоджень, тому що, дозволяє ідентифікувати зміну рівня перешкод до того, як вони приведуть до переривання обслуговування. Можливість контролю рівня помилок у лініях DSL також може використатися для виявлення обставин, що приводять до погіршення роботи кабельної мережі.

У наші дні, технології, що забезпечують високошвидкісний доступ у мережу Інтернет і з'єднання мереж між собою, доступні як ніколи. Технології DSL дозволяють розширити використання таких послуг на ті сегменти ринку, які раніше не були охоплені. Однак широкомасштабне впровадження нових технологій приводить до поступового переходу від аналогової абонентської мережі до цифрової абонентської мережі. Перехід на новий етап розвитку призводить не тільки до створення устаткування нового покоління, але й вимагає використання відповідних приладів, навчання обслуговуючого персоналу новим методам роботи й зовсім іншого підходу до питань керування мережею абонентських телефонних ліній.

## 1.2 Різні типи технологій DSL та аналіз їхньої роботи

DSL являє собою набір різних технологій, що дозволяють організувати цифрову абонентську лінію. Для того, щоб зрозуміти дані технології й визначити області їхнього практичного застосування, варто зрозуміти, чим ці технології розрізняються. Насамперед, завжди варто тримати в розумі співвідношення між відстанню, на яку передається сигнал, і швидкістю передачі даних, а також, різницю у швидкостях передачі «спадного» (від мережі до користувача) і «вихідного» (від користувача в мережу) потоку даних. DSL поєднує під своїм дахом наступні технології [4].

**ADSL** (Asymmetric Digital Subscriber Line — асиметрична цифрова абонентська лінія). Дана технологія є асиметричною, тобто швидкість передачі даних від мережі до користувача значно вища, ніж швидкість передачі даних від користувача в мережу. Така асиметрія, у сполученні зі станом «постійно встановленого з'єднання» (коли виключається необхідність щораз набирати телефонний номер і чекати встановлення з'єднання), робить технологію ADSL ідеальною для організації доступу в мережу Інтернет, доступу до локальних мереж (ЛОМ) і т.п. При організації таких з'єднань користувачі звичайно одержують набагато більший обсяг інформації, ніж передають. Технологія ADSL забезпечує швидкість «спадного» потоку даних у межах від 1,5 Мбіт/с до 8 Мбіт/с і швидкість «вихідного» потоку даних від 640 Кбіт/с до 1,5 Мбіт/с. ADSL дозволяє передавати дані зі швидкістю 1,54 Мбіт/с на відстань до 5,5 км по одній крученій парі проводів. Швидкість передачі порядку 6 - 8 Мбіт/с може бути досягнута при передачі даних на відстань не більше 3,5 км по проводах діаметром 0,5 мм.

**R-ADSL** (Rate-Adaptive Digital Subscriber Line — цифрова абонентська лінія з адаптацією швидкості з'єднання). Технологія R-ADSL забезпечує таку ж швидкість передачі даних, що й технологія ADSL, але при цьому дозволяє адаптувати швидкість передачі до довжини й стану використовуваної крученої пари проводів. При використанні технології R-ADSL з'єднання на різних телефонних лініях буде мати різну швидкість передачі даних. Швидкість передачі даних може вибиратися при синхронізації лінії, під час з'єднання або за сигналом, що надходить від станції.

**G . Lite (ADSL.Lite)** являє собою більш дешевий і простий в установці варіант технології ADSL, що забезпечує швидкість «спадного» потоку даних до 1,5 Мбіт/с і швидкість «вихідного» потоку даних до 512 Кбіт/с або по 256 Кбіт/с в обох напрямках.

**IDSL** (ISDN Digital Subscriber Line — цифрова абонентська лінія IDSL).

Технологія IDSL забезпечує повністю дуплексну передачу даних на швидкості до 144 Кбіт/с. На відміну від ADSL можливості IDSL обмежуються тільки передачею даних. Незважаючи на те, що IDSL, також як й ISDN, використовує модуляцію 2B1Q, між ними є ряд відмінностей. На відміну від ISDN лінія IDSL є не комутуючою лінією, що не призводить до збільшення навантаження на комутаційне устаткування провайдера. Також лінія IDSL є «постійно включеною» (як і будь-яка лінія, організована з використанням технології DSL), у той час як ISDN вимагає установки з'єднання.

**HDSL** (High Bit-Rate Digital Subscriber Line — високошвидкісна цифрова абонентська лінія). Технологія HDSL передбачає організацію симетричної лінії передачі даних, тобто швидкості передачі даних від користувача в мережу й з мережі до користувача рівні. Завдяки швидкості передачі (1,544 Мбіт/с по двох парах проводів й 2,048 Мбіт/с по трьох парах проводів) телекомунікаційні компанії використовують технологію HDSL як альтернативу лініям T1/E1. (Лінії T1 використовуються в Північній Америці й забезпечують швидкість передачі даних 1,544 Мбіт/с, а лінії E1 використовуються в Європі й забезпечують швидкість передачі даних 2,048 Мбіт/с.) Хоча відстань, на яку система HDSL передає дані (а це порядку 3,5 - 4,5 км), менше, ніж при використанні технології ADSL, для недорогого, але ефективного, збільшення довжини лінії HDSL телефонні компанії можуть встановити спеціальні повторювачі. Використання для організації лінії HDSL двох або трьох кручених пар телефонних проводів робить цю систему ідеальним рішенням для з'єднання УАТС, серверів

Інтернет, локальних мереж і т.п. Технологія HDSL2 є логічним результатом розвитку технології HDSL. Дана технологія забезпечує характеристики, аналогічні технології HDSL, але при цьому використовує тільки одну пару проводів.

**SDSL** (Single Line Digital Subscriber Line — однолінійна цифрова абонентська лінія). Також як і технологія HDSL, технологія SDSL забезпечує симетричну передачу даних зі швидкостями, що відповідають швидкостям лінії T1/E1, але при цьому технологія SDSL має дві важливих відмінності. По-перше, використовується тільки одна кручена пара проводів, а по-друге - максимальна відстань передачі обмежена 3 км. У межах цієї відстані технологія SDSL забезпечує, наприклад, роботу системи організації відеоконференцій, коли потрібно підтримувати однакові потоки передачі даних в обох напрямках. У певному сенсі технологія SDSL є попередником технології HDSL2.

**VDSL** (Very High Bit-Rate Digital Subscriber Line — надвисокошвидкісна цифрова абонентська лінія). Технологія VDSL є найбільше «швидкою» технологією xDSL. Вона забезпечує швидкість передачі даних «спадного» потоку в межах від 13 до 52 Мбіт/с, а швидкість передачі даних «вихідного» потоку в межах від 1,5 до 2,3 Мбіт/с, причому по одній крученій парі телефонних проводів. У симетричному режимі підтримуються швидкості до 26 Мбіт/с. Технологія VDSL може розглядатися як економічно ефективна альтернатива прокладанню волоконно-оптичного кабелю до кінцевого користувача. Однак, максимальна відстань передачі даних для цієї технології становить від 300 метрів до 1300 метрів. Тобто, або довжина абонентської лінії не повинна перевищувати даного значення, або оптико-волоконний кабель повинен бути підведений ближче до користувача (наприклад, заведений у будинок, у якому перебуває багато потенційних користувачів). Технологія VDSL може використовуватися з тими ж цілями, що й ADSL; крім того, вона може використовуватися для передачі сигналів телебачення високої чіткості (HDTV), відео за запитом й т.п.

### 1.3 Типи кодування у сімействі технологій xDSL

Залежно від швидкості передачі цифрових сигналів і технічних характеристик обладнання з'явились безліч різновидів DSL. Власне назву DSL зберегла за собою цифрова АЛ із швидкістю передачі 160 кбіт/с, яка забезпечує базовий доступ до ISDN. Один з перших типів DSL із швидкістю передачі 2048 кбіт/с отримав назву HDSL (High Bit Rate Digital Subscriber Line) - високошвидкісна DSL. Від інших DSL її відрізняє можливість використовувати для передачі одночасно до трьох АЛ (вітих пар), що дозволяє збільшити дальність зв'язку. Досконаліша SDSL (Single DSL) забезпечує ті ж характеристики, що і HDSL, але при використуванні лише однієї АЛ [6].

Класифікація технологій xDSL. Визначимося спочатку з "X", яка всім відома як аббревіатура xDSL. В даному випадку "X" - це "щось", що удосконалюється розробниками, щоб виділити те або інше рішення з широкого ряду DSL технологій. Але, якщо спочатку "X" був всього лише однією буквою - H, S, V, A, то тепер він стає словосполученням - Vo, MS, G.sh і т.д. Багато компаній, виробляє обладнання для мережі абонентного доступу, для популяризації власного продукту надбавкою "гучного скорочення" DSL розширили розуміння DSL-технологій настільки, що загубилося його початкове значення - високошвидкісна цифрова передача по мідній абонентній лінії (наприклад, позначення WDSL (Wwire less), AirDSL, skyDSL - це тільки радіодоступ).

Буква X перед DSL означає лише версію технології, причому позначення цієї версії для більшості технологій не стандартизовано. Виключення складають ті з xDSL технологій, назви яких узаконені ETSI - European Tele communications Standards Institute, ANSI - American National Standards Institute або ITU (International Tele communication Union).

Типи і список стандартів, які діють в DSL світі, наведені в таблиці 1.1. Звісно, якщо та або інша технологія не стандартизовані, це не означає, що її не можна застосовувати. Більшість з DSL технологій стандартизувалися "дефакто", тобто стандарт створювався вже після того, як технологія пройшла перевірку масовим використанням.

Таблиця 1.1. – Типи високошвидкісного цифрового абонентного доступу

Технологія	Метод передачі Режим роботи	Кодування	Швидкість обміну, кбіт/с Висхідний потік/ Низхідний потік	Число пар кабелю Максимальна дальність, км/діаметр жили
DSL (Digital Subscriber line) Цифрова абонентна лінія (ЦАЛ)	Чотирьохрівневий АІМ/ Симетричний дуплекс	2B1Q	160	2 1,5/0,5
IDSL (ISDN DSL) ISDN ЦАЛ	Чотирьохрівневий АІМ/ Симетричний дуплекс	2B1Q	128	2 7,5-8/0,5
HDSL (High-Bitrate DSL) Високошвидкісна ЦАЛ	Квадратура АФМ (чотирьохрівневий АІМ)/ Симетричний дуплекс	CAP 8, CAP16, CAP32, CAP64 (2B1Q)	768, 1024 по одній парі, 2048 по двох	2; 3 4-6/ 0,4-0,5 18-20/ 1,2
SDSL (Singl Pair DSL)	Квадратура АФМ без передачі несучої/ Симетричний дуплекс	CAPS, CAP16, CAP32, CAP64, TC- PAM	2048	1 (2) 3-4/4-6/0,4- 0,5 10-12/1,2
VDSL (Veri High - bitrate DSL) Надвисокошвидкісна ЦАЛ	ОГС (передача ортогональним гармонійним сигналом)/ Асиметричний дуплекс	DMT (Discrete Multitone) (CAP32, CAP64, CAP128)	1500-12000/ 2300-51000	0,3/0,5
ADSL (Asymmetric DSL) Асиметрична ЦАЛ	Квадратура АФМ (ОГС)/ Асиметричний дуплекс	CAPS, CAP16, DMT	16-S40/ 1554-8448	1 2,7/0,5
ADSLite Асиметрична ЦАЛ полегшена	Квадратура АФМ (ОГС)/ Асиметричний дуплекс	CAPS, DMT	384/1554	1 3/0,4
UADSL (Universal ADSL) Різновид ADSL універсальний	Квадратура АФМ (ОГС)/ Асиметричний дуплекс	CAP8, DMT	542/1554	1 3/0,4
RADSL (Rate-adaptive DSL) Адаптивна ЦАЛ	Квадратура АФМ (ОГС)/ Асиметричний дуплекс	CAPS, DMT	128- 600/ 1000-7000	1 3/0,5

MSDSL (Multi Speed DSL) Адаптивна по швидкості ЦАЛ	Квадратура АФМ (ОГС)/ Асиметричний дуплекс	Вдосконалена 2В1Q, CAP32, CAP64, CAP128	144-2300	1 (виділена) 3,4-4,7/0,5 11-13/ 1,2
HDSL-2 Високошвидкісна ЦАЛ	Імпульсна АФМ з кодуванням трелліс/ Симетричний дуплекс	ТС-РАМ	2300	1 3-4/0, 4

## Розділ 2. ФАКТОРИ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ З'ЄДНАНЬ DSL

З розробкою концепції DSL значно змінилася ідеологія розвитку мережі зв'язку. Якщо раніше широко існувала думка, що довести "цифру в кожний будинок" можна лише за допомогою масового впровадження оптичних кабелів, то після практичної апробації технологій DSL, особливо HDSL (див. нижче), у операторів зв'язку з'явилася впевненість в тому, що існуюча мережа мідних кабелів зв'язку ще довго залишиться тією основою, на якій будуватиметься вся телекомунікаційна інфраструктура [7].

На рисунку 2.1 показана еволюція мідно-кабельних ліній як середовища передачі цифрової інформації від азбуки Морзе (10 біт/с) до технологій VDSL (51 Мбіт/с). Технології цифрових абонентних ліній, що почали свій розвиток в 70-х роках створенням пристроїв доступу Basic Rate ISDN (144 кбіт/с) і обіцяючи в недалекому майбутньому масове впровадження обладнання VDSL, дозволяють досягти на мідному кабелі швидкостей передачі, раніше доступних лише на волоконно-оптичних лініях (ВОЛЗ).

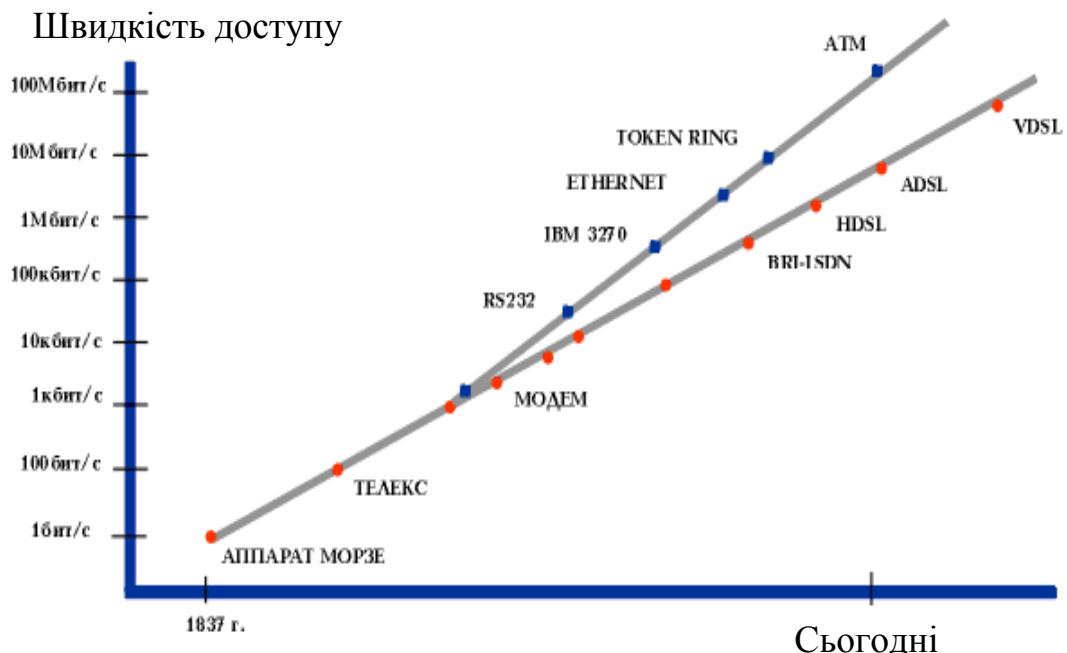


Рисунок 2.1 – Зростання швидкості цифрової передачі по мідних лініях зв'язку

Основоположним принципом, на якому побудовано сімейство технологій Digital Subscriber Line (DSL), є використання для передачі даних мідних дротів, які спочатку були призначені для підключення абонентів до АТС - Plain Old Telephone Service (POTS). При передачі інформації по POTS, мідним дротам різної товщини, - відсутній основний фактор, який обмежує швидкість передачі даних в самій АТС - обмеження спектру інформаційного сигналу діапазоном 3,1кГц. Всі передачі подібного типу виконуються за схемою крапка-крапка, і в загальному випадку, між передавачем і приймачем сигналу знаходиться тільки мідний сполучний провід. Отже, принаймні теоретично, по такій лінії можна передавати інформацію з будь-якою швидкістю. Проте реальні лінії, з якими доводиться мати справу xDSL пристроям, істотно відрізняються від цієї спрощеної математичної моделі і мають ряд особливостей, без урахування яких неможлива побудова сучасної високопродуктивної системи передачі даних.

Найцікавішими для експлуатації чинником, безпосередньо впливаючим на параметри якості DSL, є параметри абонентної кабельної пари. Оскільки абонентний кабель і його параметри не привноситься технологією DSL ззовні, а вже є у оператора в тому вигляді і стані, в якому він дожив до ери NGN, то тут міститься найслабший елемент технологічного ланцюга DSL. І хоча між вимірюваннями параметрів кабелю і вимірюваннями DSL не можна поставити знак рівності, вимірювання параметрів абонентних пар - це більше 50% всіх експлуатаційних вимірювань на початкових етапах впровадження DSL.

Розглянемо коротко, які параметри абонентних ліній можуть виявитися критичними для якості DSL.

## **2.1 Базові параметри абонентних кабелів**

Почнемо із загальних (або базових) параметрів абонентних кабелів. До них відносяться всі ті параметри, які історично використовувалися для паспортизації кабельної системи оператора. Можна стверджувати, що це група параметрів і методів їх аналізу, однакова для будь-яких абонентних кабелів, не дивлячись на їх тип і спосіб використання. Дійсно, якщо є металевий кабель, то він має опір, ємність, параметри ізоляції, і всі перераховані параметри не залежать від того, з якою метою кабель прокладений. Він може використовуватися для звичайного телефонного зв'язку, для DSL, для системи радіофікації і ін. І для всіх додатків необхідний певний набір параметрів, що дозволяють судити про якість абонентної пари. Саме тому такі параметри називаються базовими [7].

Базові параметри абонентної пари повністю описані в нормативних документах і добре відомі. До основних базових параметрів можна віднести:

- наявність постійної/змінної напруги на лінії;
- опір абонентного шлейфу;
- опір ізоляції абонентного шлейфу;
- ємність і індуктивність абонентного шлейфу;
- комплексний опір лінії на певній частоті;
- симетрію пари в значенні омичного опору.

Значення перерахованих параметрів визначають якість абонентної пари, і вже на цій підставі можна говорити, що вони важливі для паспортизації кабелів під DSL.

## 2.2 Спеціалізовані параметри кабелю

Процедурно спеціалізовані параметри відрізняються від базових тим, що будь-які вимірювання цих параметрів завжди спираються на методики частотного тестування лінії. Згідно даним методикам для діагностики абонентного кабелю слід подати тестовий спеціалізований сигнал і аналізувати якість проходження такого сигналу по лінії (відгук).

До спеціалізованих параметрів відносяться:

- загасання в кабелі;
- шум в широкій смузі частот і відношення сигнал/шум (SNR);
- амплітудно-частотна характеристика (АЧХ);
- перехідне загасання на ближньому кінці (NEXT);
- перехідне загасання на дальньому кінці (FEXT);
- імпульсні завади;
- поворотні втрати;
- симетрія пари в значенні нерівномірності характеристик передачі.

*Послаблення сигналу.* Загасання сигналу в кабельній лінії залежить від типу кабелю, його довжини і частоти сигналу. Чим довше лінія і вище частота сигналу, тим вище загасання. Ослаблення при передачі інформаційного сигналу викликано наявністю омичного опору лінії. Чим менше діаметр перетину дроту і чим довше провід, який сполучає приймач сигналу з передавачем, тим менший рівень сигналу отримає користувач. Отже, буде складніше розпізнати прийнятий сигнал на фоні шуму, і зросте рівень помилок при передачі даних. Для характеристики якості прийнятого сигналу в системах передачі даних використовують співвідношення сигнал/шум Signal - Noise Ratio (SNR), яке обчислюється в децибелах (dB). Рівень сигналів прийнято указувати у вигляді відношення до мілівату, яке також обчислюється в децибелах (dBm). Крім активної, опір лінії має також реактивні складові, слідством цього є частотна нерівномірність ослаблення сигналу.

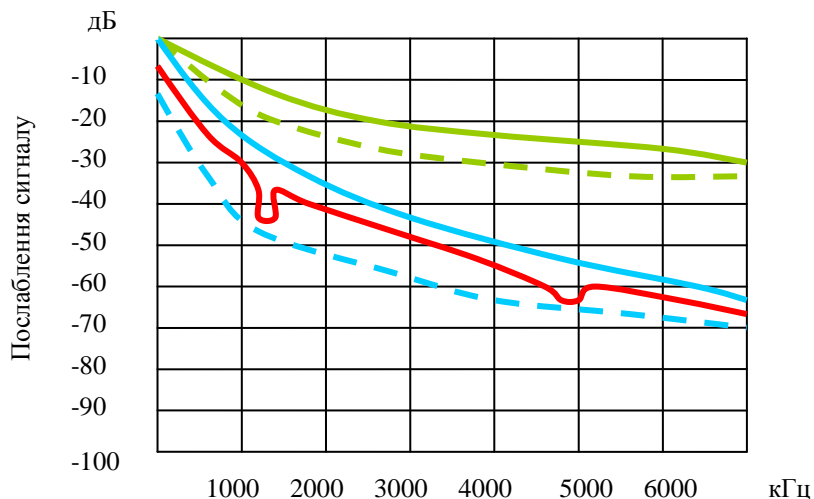


Рисунок 2.2 – Залежність величини сигналу від довжини лінії і частоти переданого сигналу

Найбільш часто для передачі сигналів DSL використовуються лінії з проводом, який має перетин 0.4 мм (26 AWG) і 0.5 мм (24 AWG). На приведеній вище діаграмі представлена залежність величини загасання сигналу в лінії від довжини цієї лінії і частоти передаваного сигналу. Суцільними лініями на цій діаграмі відображена залежність, яка відповідає перетину дроту 0.5 мм (24 AWG). Пунктирні лінії відповідають перетину дроту 0.4 мм (26 AWG). Червона лінія на діаграмі відображає залежність величини загасання сигналу в лінії, яка має пасивне (неузгоджене) відгалуження (bridged tap) довжина якого складає 30 метрів (100ft). При використанні



двохпроводної сполучної лінії, сигнал, що передається, відображається від закінчення неузгодженого відгалуження і поступає на приймач вже як завада. Наявність таких відгалужень у лінії призводить до збільшення частотної нерівномірності ослаблення сигналу в лінії.

*Нелінійність АЧХ.* Як правило, кабельна лінія зв'язку є фільтром нижніх частот.

*Перехресні переходи сусідніх каналів.* Теоретично значення співвідношення SNR можна збільшити, якщо підняти рівень передаваного сигналу. Проте в цьому випадку зросте і рівень завади, яку даний сигнал подаватиме на сусідні канали. Тому стандарти DSL чітко визначають максимальний рівень сигналу, який може передаватися в лінію - звичайно цей рівень відповідає значенню -13.5 dBm. Крім електричних наведень від зовнішніх джерел електромагнітного випромінювання (атмосферні розряди) найбільший вплив на сигнал, що приймається, мають якраз ті завади, які викликані високошвидкісною передачею даних по решті пар багатожильного кабелю. В термінології DSL такі завади називаються NEXT (Near End Cross talk). Значення NEXT збільшується при збільшенні числа пар даного кабелю, які використовуються для передачі даних і при збільшенні частоти, з якою передаються ці дані. Забезпечення спектральної сумісності є однією з найважливіших задач, які розв'язуються при розробці і реалізації різних алгоритмів лінійного кодування передаваних даних. Третій фактор, який безпосередньо впливає на параметри якості DSL на рівні абонентного кабелю, - наявність в кабелі неоднорідностей. Будь-які неоднорідності в абонентному кабелі негативно позначаються на параметрах передачі. Як ілюстрація процесів, що відбуваються в системі передачі, на рис. 2.3 показано паралельне відпаювання, що є досить частим явищем на вітчизняній мережі

У разі передачі широкосмугового сигналу через паралельне відпаювання передаваний сигнал спочатку розгалужується, а потім відображається неузгоджено від кінця відпаювання. В результаті на стороні приймача два сигнали - прямий і відображений накладаються один на одний, причому, відображений сигнал може розглядатися як шумовий. Оскільки шумовий сигнал у випадку, зображеному на рис. 2.3, має ту ж структуру, що і звичайний сигнал, його вплив є максимальним на параметри якості передачі.

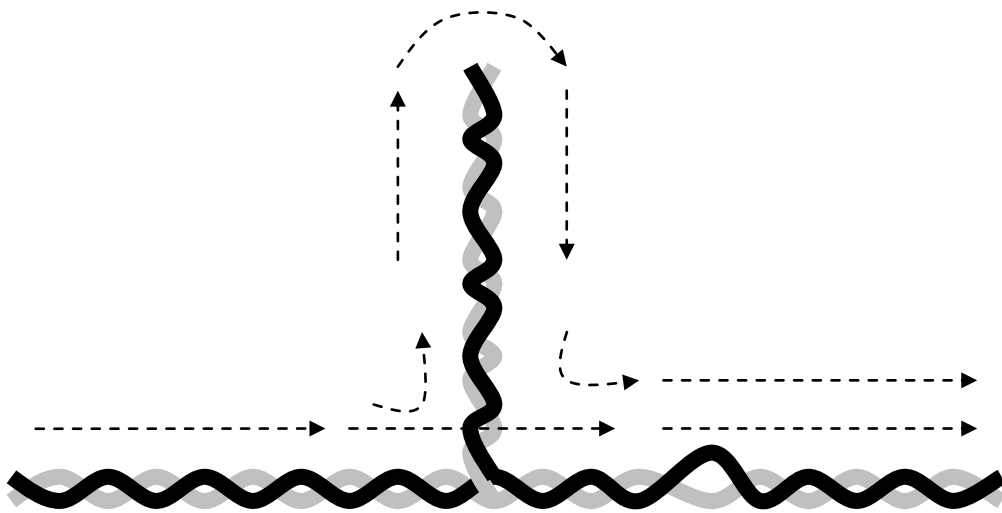


Рисунок 2.3 - Ілюстрація процесів, що відбуваються в системі передачі (прямий і відображений сигнал)

*Рівень* деструктивного впливу відображеного сигналу на пряму залежатиме від рівня віддзеркалення на відпаюванні. З теорії сигналів рівень віддзеркалення буде тим вище, чим більше частота передаваного сигналу. В результаті будь-які системи широкосмугової передачі являються дуже чутливими до будь-кої неоднорідності в кабелі. У разі DSL чутливість до

неоднорідностей троху компенсується адаптивним підстроюванням пари модем-DSLAM, так що наявність відпаювань не віднімає можливість передачі. Але у разі відпаювання швидкість передачі DSL різко падає, що дозволяє виробникам обладнання і системникам висувати вимоги про неприпустимість неоднорідностей в кабелі для DSL.

#### *Перехідні завади*

Четвертим чинником, що впливає в кабелі на параметри передачі ADSL, виступає фактор взаємного впливу абонентних кабелів одне на одного. Методично параметри взаємного впливу отримали назву перехідних завад, або перехідного загасання. Розрізняють два параметри перехідних завад (рис. 2.4).

- перехідне загасання на ближньому кінці (тобто вплив ближнього передавача на приймач на ближньому кінці);
- перехідне загасання на дальньому кінці (тобто вплив дальнього передавача на приймач на ближньому кінці).

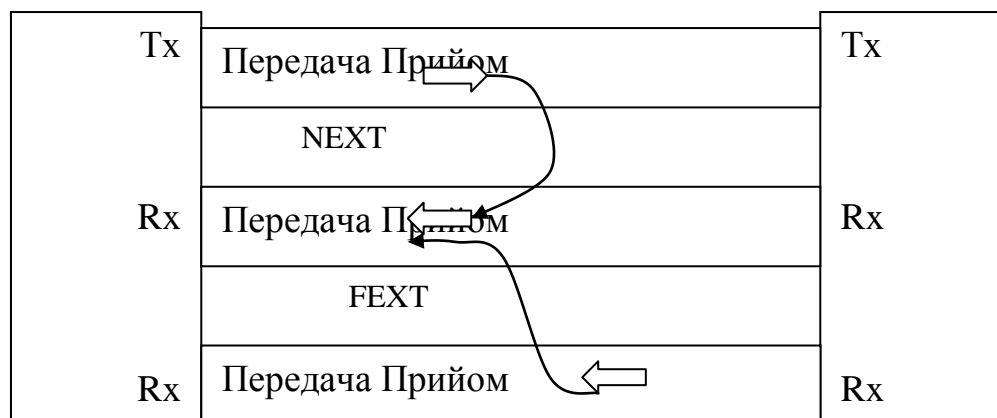


Рисунок 2.4 - Перехідні завади

Номінально FEXT і NEXT відносяться до спеціалізованих параметрів кабельної пари. Але роль цього параметра настільки унікальна, що вимагає окремого розгляду і дослідження. Достатньо сказати, що, не дивлячись на існування понять NEXT і FEXT вже не один десяток літ, загальної методології вимірювань цих параметрів немає, і в умовах абонентської мережі NGN її навряд чи можна побудувати. Далі, сам вплив на параметри якості зі сторони перехідних завад може бути дуже складним. Для явища перехідних завад характерний фактор випадковості. Наприклад, взаємний вплив однієї пари на іншу може існувати потенційно, але ніяк не виявлятися до тих пір, поки по одній парі йде телефонія, а по іншій DSL. Та варто підключити нового абонента DSL - і цей вплив може «вбити» якість зв'язку в обох парах. Те ж відноситься до завад від зовнішніх джерел електромагнітного випромінювання - в загальному випадку передбачити їх прояв на окремій парі неможливо.

Можна вказати для параметрів якості DSL наступні типи можливих перехідних завад.

- Впливи абонента DSL на іншого абонента DSL.
  - Вплив радіочастот діапазону АМ на DSL.
  - Вплив зовнішніх електромагнітних завад.
  - Вплив від цифрових систем передачі (E1, HDSL і ін.).
- інших процесів в системі експлуатації.

#### *Радіочастотна інтерференція.*

*Груповий час затримки.* Швидкість розповсюдження сигналу в кабелі залежить від його частоти, таким чином, навіть при рівномірній АЧХ форма імпульсу при передачі спотворюється.

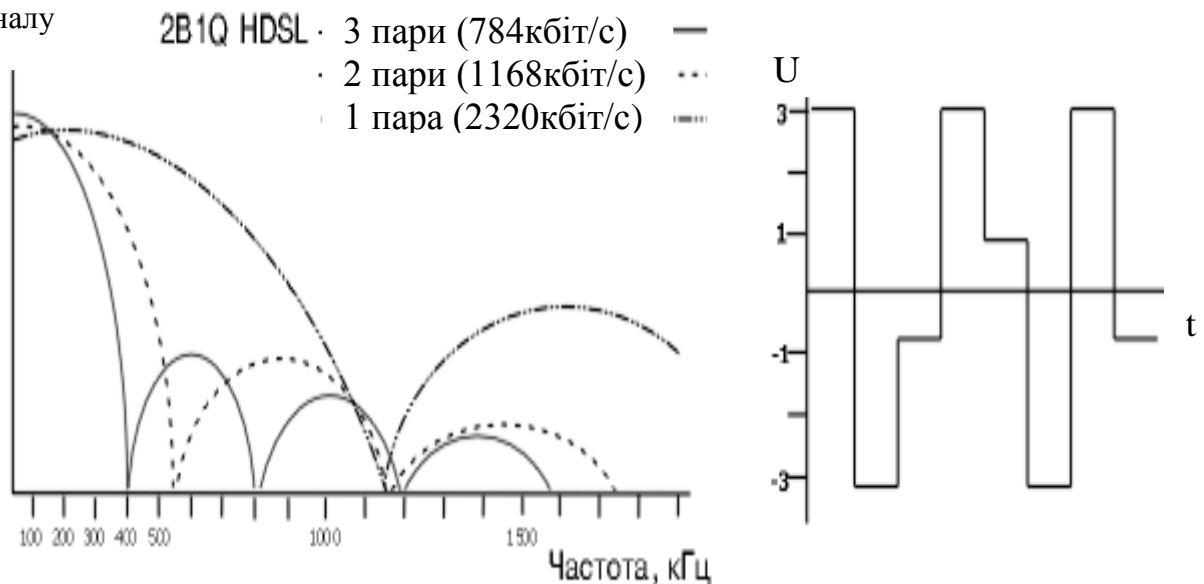
Таким чином для того, щоб бути привабливою для споживача, технологія повинна забезпечити якомога більшу швидкість передачі даних. Проте, підвищення швидкості, з якою передаються дані по мідному дроту, призводить до погіршення якості сигналу, що приймається, і до зростання завад, які даний інформаційний сигнал подає на сусідні канали. Для того, щоб забезпечити можливість рішення сукупності цих проблем застосовуються спеціальні методи лінійного кодування (алгоритми модуляції), використання яких дозволяє передавати дані з достатньо високими швидкостями. При цьому переданий в лінію інформаційний сигнал має такі параметри, які забезпечують можливість достовірного прийому і не мають катастрофічного впливу на якість сусідніх інформаційних каналів.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОДУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ xDSL

#### 3.1 Кодування 2B1Q

Першою була розроблена технологія 2B1Q, яка залишається широко поширеною в країнах Західної Європи і США. Технологія 2B1Q спочатку використовувалася в мережах ISDN для передачі потоку 144 кбіт/с (2B+D, BR ISDN). Потім вона була модернізована для передачі більш високошвидкісних потоків. Код 2B1Q є модульованим сигналом, що має 4 рівні, тобто в кожний момент часу передається 2 біти інформації (4 кодові стани). Спектр лінійного сигналу симетричний і достатньо високочастотний (див. рисунок 3.1), присутні також низькочастотні і постійна складові [7].

Потужність  
сигналу



а) б)

Рисунок 3.1. - Технологія кодування 2B1Q

Алгоритм 2B1Q є одним з варіантів реалізації алгоритму амплітудно-імпульсної модуляції з чотирма рівнями вихідної напруги без повернення до нульового рівня (NRZ).

Для формування лінійного коду вхідний інформаційний потік ділиться на кодові групи по два біти в кожній. Залежно від комбінації значень бітів кодової групи їй ставиться у відповідність один з чотирьох кодових символів, кожному з яких у свою чергу ставиться у відповідність один з рівнів кодової напруги.

Таким чином, закодований відповідно до правил алгоритму 2B1Q, сигнал є послідовністю напруг, що стрибкоподібно змінюються:

Таблиця 3.1. – Значення бітів кодової групи

Кодова група	Кодовий символ	Кодова напруга
00	-3	-2,5В
01	-1	-0.833В
10	+3	2.5В
11	+1	0.833В

Розглянемо, як впливають на передачу коду 2B1Q різні чинники.

В міських умовах створюється велика кількість низькочастотних впливів, наприклад, при запуску могутніх електричних машин (метро, трамваї і т.д.), електрозварюванню, крім того, в кабелях зв'язку створюється велика кількість імпульсних завад (набір номера, передача сигналів сигналізації і т.д.). Комплекти ВІС (великих інтегральних схем), що реалізують технологію 2B1Q, використовують достатньо складні методи корекції спотворень в низькочастотній області спектру і забезпечують задовільну якість передачі. Разом з тим кодування 2B1Q все ж таки залишається чутливим до спотворень, оскільки сигнал має постійну складову, і більш того, максимум енергетичного спектру доводиться на низькі частоти.

Великий розкид частот в спектрі сигналу 2B1Q веде до виникнення труднощів, пов'язаних з груповим часом затримки. Мікропроцесорна обробка, втім, допомагає розв'язати і ці проблеми, хоча алгоритм обробки сигналу істотно ускладнюється.

Серйозний вплив на передачу має радіочастотна інтерференція. Радіопередачі в діапазонах довгих і середніх хвиль, робота могутніх радіорелейних ліній викликають наведення на кабельну лінію і заважають передачі коду 2B1Q, якщо мають співпадаючі ділянки спектрів. Цей чинник особливо негативно позначається при використуванні апаратури HDSL для з'єднання студій і радіопередаючих центрів, а також при монтажі устаткування в приміщеннях або в безпосередній близькості телерадіоцентрів.

Спектр коду 2B1Q містить високочастотні складові, максимум енергії передається в першій "пелюстці", ширина його пропорційна швидкості на лінії. Як вже наголошувалося, загасання сигналу в кабелі зростає із збільшенням його частоти, тому залежно від необхідної дальності застосовується одна з трьох швидкостей лінійного сигналу (784, 1168 або 2320 кбіт/с). Технологія 2B1Q для передачі потоку 2 Мбіт/с використовує одну, дві або три пари мідного кабелю. По кожній з пар передається частина потоку (див. рисунок 3.1) з вищезазначеними швидкостями. Найбільша дальність роботи досягається при використанні трьох пар (близько 4 км по жилі 0,4 мм), найменша — при роботі по одній парі (менше 2 км).

З огляду на те, що дистанція роботи систем HDSL (кодування 2B1Q), що використовують одну пару, не задовольняє базовим вимогам за дальністю, такі системи не знайшли широкого розповсюдження. Системи, що працюють по трьох парах, дотепер достатньо широко використовуються, проте поступово витісняються системами, що застосовують технологію CAP (див. нижче) і забезпечуючими ту ж дальність по двох парах. З систем з кодуванням 2B1Q найбільше розповсюдження мають системи, що працюють по двох парах. Їх дальність роботи (близько 3 км по жилі 0,4 мм) забезпечує переважну більшість задач доступу в

країнах Західної Європи і США, де довжина АЛ в 80% випадків (дані Schmid Telecom AG) не перевищує 3 км.

#### *Потужність переданого в лінію сигналу*

Значення потужності 2B1Q - модульованого сигналу, вимірюване в діапазоні від 0 Гц до  $f_{sym}$  при імпедансі лінії 135 Ом, повинне задовольняти співвідношенню:

$$P=(13,5\pm 0,5)\text{dBm}$$

#### *Вимоги до характеристик лінійних пристроїв*

Значення величини загасання сигналу, що повертається, (Return Loss, RL), вимірюваного стосовно 135 Ом у діапазоні від 0 Гц до  $f_{sym}$ , повинне бути не менше 12 dB. (Цей параметр визначає значення припустимого впливу переданого в лінію сигналу на прийнятий сигнал.)

#### *Співвідношення сигнал/шум*

На діаграмі представлена залежність співвідношення SNR (Signal-Noise Ratio) від відстані поширення 2B1Q-модульованих сигналів, які забезпечують передачу даних зі швидкостями 1168 і 2320 Кбіт/сек.

Приведені значення співвідношення сигнал/шум були обчислені для лінії з дротом 26-AWG (0,4мм) стосовно граничного значення SNR(21.3 dB) і враховують тільки перешкоди, що викликані впливом переданого сигналу на прийнятий сигнал (near end cross talk noise - NEXT). Відзначене на діаграмі пунктиром значення SNR\* рівне 6dB, відповідає мінімальному перевищенню співвідношенням SNR рівня 21.3dB, що гарантує частоту появи помилок (Bit Error Rate - BER) не більш  $10^{-7}$ .

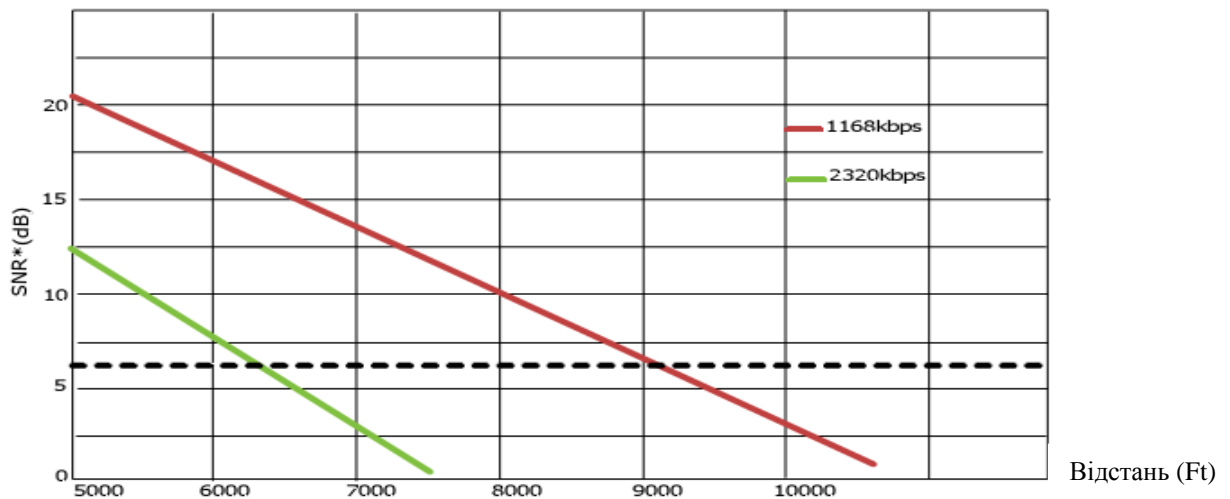


Рисунок 3.2 – Залежність відношення сигнал/шум від довжини лінії

На думку більшості експертів, з технічної точки зору технологія 2B1Q дещо поступається більш пізній технології лінійного кодування — CAP (див. нижче). Проте в світі дотепер проводиться велика кількість устаткування, яке використовує 2B1Q. Чому? Відповідь достатньо очевидна. По-перше, довжина абонентських ліній в США і Західній Європі, як правило, достатньо невелика, так що дальності 2B1Q цілком достатньо. Якість кабелю у вищезазначених регіонах також достатньо висока, що знижує вплив різних чинників, що заважають. По-друге, важливою гідністю технології 2B1Q є її дешевизна. Близько десяти крупних виробників ВІС поставляють комплексні рішення для створення устаткування HDSL за технологією 2B1Q. Наявність конкуренції, природно, позитивно позначається на ціні мікросхем

і готових модулів приймач-передавач. На думку зарубіжних експертів, технологія 2B1Q стає все більш і більш "доступною": багато компаній, що навіть не спеціалізуються на виробництві устаткування HDSL, отримують можливість швидко і дешево розробити власний пристрій або блок HDSL з використанням готових рішень (іноді цілих HDSL модулів) від постачальників ВІС, таких, як Metalink, Brooktree (Rockwell), PairGain Technologies і ін.

#### *Область застосування алгоритму*

Крім свого основного застосування в ISDN алгоритм лінійного кодування 2B1Q знайшов досить широке застосування в пристроях xDSL із симетричними швидкостями передачі даних HDSL і SDSL. Оскільки через особливості спектра 2B1Q-модульованого сигналу переданий і прийнятий сигнал не можуть бути рознесені в різні частотні області, реалізації SDSL у даному випадку повинні використовувати механізм придушення еха переданого сигналу в приймачі (echo-cancellation).

#### *Переваги і недоліки алгоритму 2B1Q*

Безсумнівною перевагою даного алгоритму є простота і дешевизна його реалізації. Важливим фактором є наявність великого числа регламентуючих документів (у тому числі специфікація ANSI T1.601-1999, ISDN Basic Access Interface for Use on Metallic for Application at the Network Side of NT, Layer 1 Specification).

До недоліків цього методу лінійного кодування варто віднести вкрай невисоку спектральну ефективність і, отже, обмежені можливості для передачі інформаційного сигналу по зашумленим лініям з великим загасанням. Можливості використання амплітудної модуляції взагалі не дуже високі, тому що, в даному випадку число рівнів квантування росте зі швидкістю  $2^N$ , де N - число переданих за період модульованого сигналу розрядів, що призводить до різкого зменшення теоретично досягаемого співвідношення сигнал/шум. Крім того, спектр амплітудно-імпульсного модульованого сигналу, як було показано вище, є нескінченним і його максимум припадає на діапазон звукових частот.

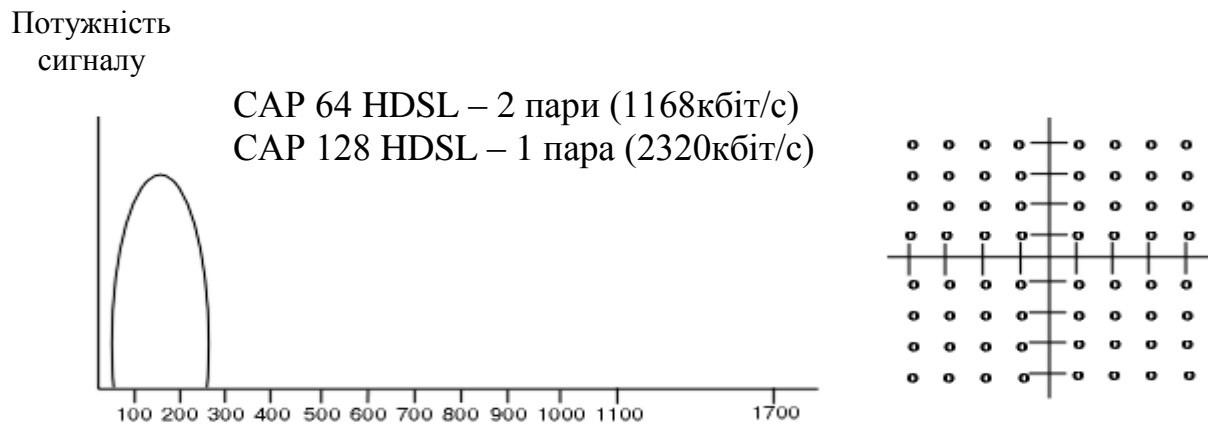
Не зважаючи на те, що перераховані вище фактори, безсумнівно, будуть обмежувати застосування цього типу лінійного кодування в перспективних xDSL системах з інтеграцією послуг, безсумнівні переваги алгоритму 2B1Q дозволять досить ефективно його застосовувати для побудови дешевих систем симетричного доступу.

## **3.2 Кодування CAP**

Алгоритм амплітудно-фазової модуляції з придушенням несучої carrier less amplitude modulation/phase modulation (CAP) є одним з найбільш широко використовуваних сьогодні на DSL лініях. Цей алгоритм був розроблений фахівцями компанії GlobeSpan Inc. у той же час, коли ця компанія була частиною компанії Paradyne у складі AT&T. В даний момент патент на використання алгоритму амплітудно-фазової модуляції з придушенням несучої для формування лінійного коду належить компанії GlobeSpan Inc. Алгоритм CAP являє собою одну з різновидів алгоритму QAM, його особливість полягає в спеціальній обробці модульованого інформаційного сигналу перед його відправленням у лінію. У процесі обробки зі спектра модульованого сигналу виключається складова, котра відповідає частоті несучого коливання QAM. Після того, як приймач приймає переданий інформаційний сигнал, він спочатку відновлює частоту несучого коливання, а після цього відновлює інформаційний сигнал. Такі маніпуляції зі спектром виконуються для того, щоб зменшити частку неінформативної складової в спектрі переданого інформаційного сигналу. Це у свою чергу робиться для того, щоб забезпечити велику дальність поширення сигналу і зменшити рівень перехресних перешкод у сигналів, що передаються одночасно в одному кабелю [7].

Що ж до країн Східної Європи, Південної Америки, Азії, то, зважаючи на більшу довжину абонентних і сполучних ліній, більш низького, як правило, якості укладених кабелів, великим попитом користуються системи HDSL, що базуються на технології CAP (Carrierless

Amplitude and Phase Modulation) — амплітудно-фазової модуляції без передачі несучої. Розробник технології — компанія GlobeSpan (була AT&T) — поставила собі за мету створити вузькосмугову технологію лінійного кодування, не чутливу до більшості зовнішніх завад, що, як показує досвід впровадження систем HDSL CAP в світі і в Росії, цілком вдалося.



а) б)

Рисунок 3.3 - Технологія кодування CAP: а) спектр сигналу; б) модуляційна діаграма

Модуляція CAP поєднує в собі останні досягнення модуляційної технології і мікроелектроніки. Модуляційна діаграма сигналу CAP нагадує діаграму сигналу модемів для телефонних каналів, що працюють по протоколах V.32 або V.34. Несуча частота модулюється за амплітудою та фазою, створюючи кодовий простір з 64 або 128 станами, при цьому, перед передачею в лінію сама несуча, не передаючи інформацію, але що містить найбільшу енергію, "вирізається" з сигналу, а потім відновлюється мікропроцесором приймача. Відповідно 64-позиційній модуляційній діаграмі сигнал CAP-64 передає 6 біт інформації в кожний момент часу, тобто в 16 разів більше в порівнянні з 2B1Q. Модуляція CAP-128, вживається в системах SDSL (2 Мбіт/с по одній парі), має 128-позиційну модуляційну діаграму і, відповідно, передає 7 біт за один такт. Підсумком підвищення інформативності лінійного сигналу є істотне зниження частоти сигналу і ширини спектру, що, у свою чергу, дозволило уникнути діапазони спектру, найбільш схильних до різного роду завадам і спотворенням.

#### *Опис алгоритму*

На перший погляд, назва алгоритму звучить досить парадоксально і змушує згадати сюжет російської народної казки про кашу із сокири. Дійсно, з модульованого сигналу пропонується виключити саме ту гармонійну складову, котра повинна була використовуватися для переносу корисного сигналу. Однак якщо більш докладно розглянути схему формування сигналу, стане зрозуміло, що алгоритм CAP у частині формування лінійного коду практично нічим не відрізняється від класичних алгоритмів гармонійної амплітудної модуляції.

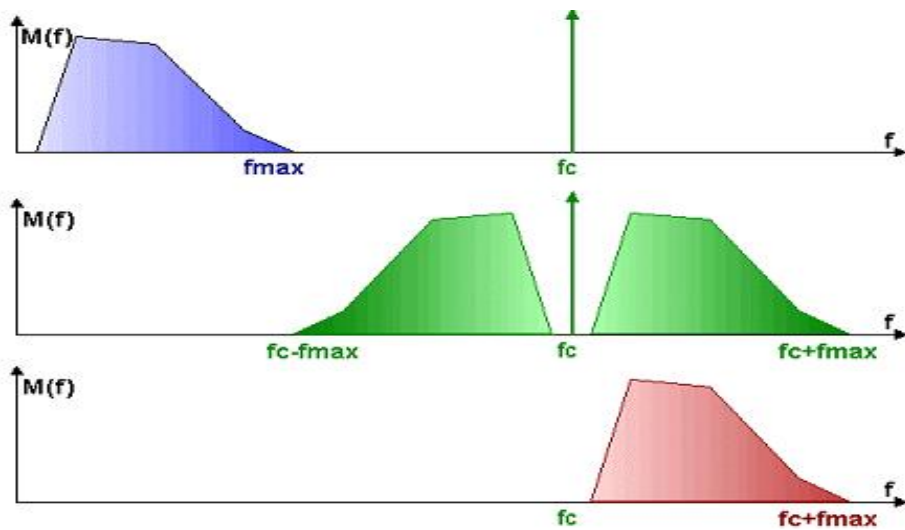


Рисунок 3.4 – Алгоритм модуляції САР

Синім кольором на малюнку, що приведений зліва, відзначений спектр переданого корисного сигналу. Максимальна частота цього сигналу має значення  $f_{\max}$ . Частота коливання, що модулює - носія має значення  $f_c$ . Після виконання процедури гармонійної амплітудної модуляції спектр корисного сигналу переноситься в область частоти  $f_c$  і здобуває дзеркальні складові. На малюнку цей спектр позначений зеленим кольором. Для забезпечення відновлення переданого сигналу на прийомному кінці досить передати тільки одну із дзеркальних компонентів спектра модульованого сигналу.

Гармоніка з частотою  $f_c$  також є компонентою спектра модульованого сигналу, однак, при відновленні сигналу, і без неї теж можна обійтися. Теоретично, амплітуда цієї гармоніки несе інформацію про рівень постійної складової переданого сигналу (складова спектра сигналу з частотою  $= 0$ ). У силу цього, дана гармоніка не є повною мірою інформативною, і її втрата не вплине на якість відновленого прийнятого сигналу. Хоча виключення гармоніки  $f_c$  з переданого сигналу призводить до виникнення визначених труднощів при відновленні прийнятого сигналу, ця процедура цілком виправдана, оскільки дозволяє істотно зменшити рівень неінформативного сигналу, що передається в лінію. Червоним кольором на приведеному вище малюнку показаний спектр модульованого коливання, що сформований відповідно до принципів алгоритму САР. Таким чином, основні принципи формування лінійного коду алгоритму САР відповідають принципам формування лінійного коду QAM. Відмінності зазначених алгоритмів полягають у включенні додаткових процедур, що використовуються для формування і відновлення спектра САР-модульованого сигналу. Одна з можливих функціональних схем формування сигналу, модульованого відповідно до принципів алгоритму САР, представлена на малюнку, що приведений нижче.

У даному випадку для придушення гармоніки несучого коливання використовуються синфазний і квадратурний фільтри. Для адекватного відновлення сформованого сигналу на приймальній стороні повинні бути виконані відповідні процедури по відновленню несучого коливання. Після відновлення несучої, приймач, що функціонує відповідно до алгоритму САР, відновлює власне переданий сигнал, використовуючи при цьому ті ж алгоритми, що і приймач QAM-модульованого коливання. Тому, принаймні теоретично, приймач САР може взаємодіяти з передавачем QAM.



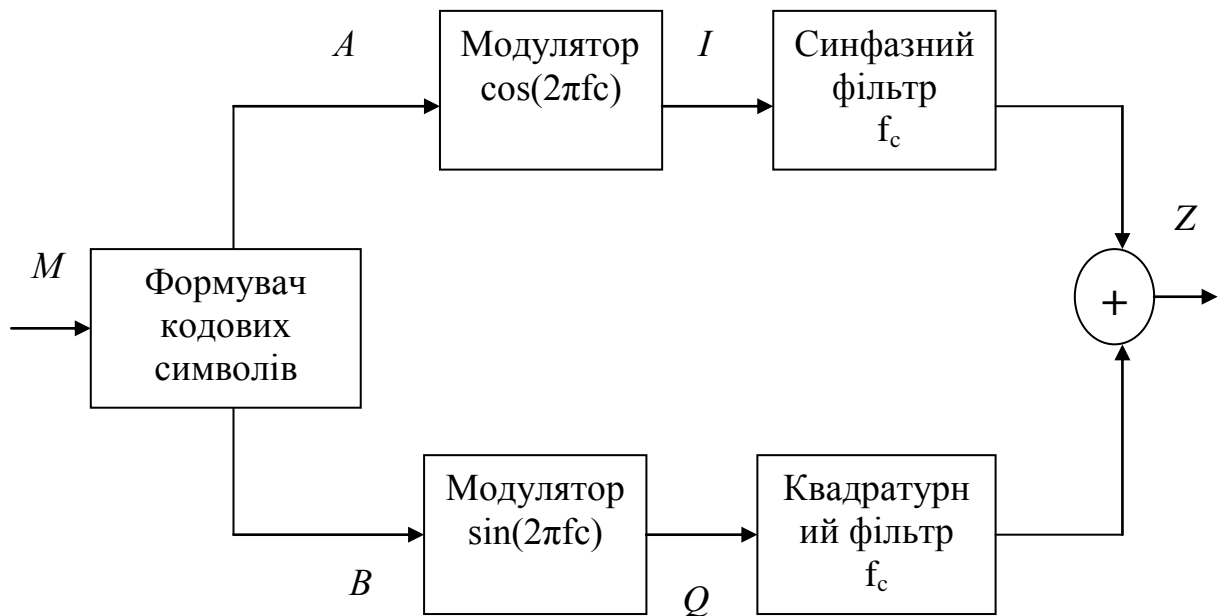


Рисунок 3.5 - Функціональна схема формування сигналу, модульованого відповідно до принципів алгоритму CAP

#### Характеристики алгоритму

Алгоритм CAP може бути використаний для формування лінійного коду в різних технологіях DSL. На приведеному нижче рисунку представлено схематичне зображення спектрів CAP-модульованих MSDSL сигналів.

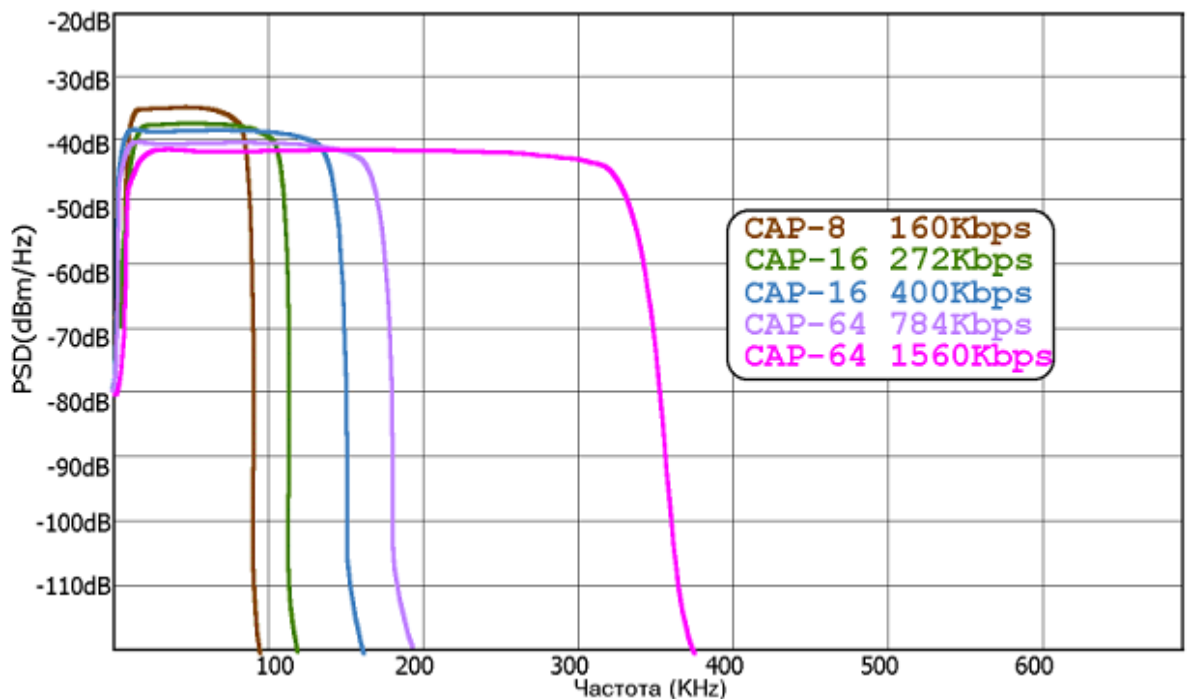


Рисунок 3.6 - Схематичне зображення спектрів CAP

У даному випадку застосування алгоритму CAP доцільно, оскільки при використанні пересічних частотних діапазонів переданого і прийнятого сигналів одним з основних факторів, що обмежує дальність поширення сигналу в лінії, є ступінь ефективності придушення в приймачі луни переданого сигналу (echo cancellation). Оскільки в загальному випадку, рівень

сигналу який передається в лінію формувачами CAP, нижче (за рахунок придушення несущої), отже, меншим буде і рівень вілуння від передавача.

З не меншим успіхом цей алгоритм може бути використаний для формування лінійного коду в асиметричних високошвидкісних приймально-передавальних системах технологій ADSL і VDSL. Для цих технологій істотним фактором є можливість частотного поділу інформаційних сигналів, що одночасно приймаються і передаються по одній парі проводів. На приведеному нижче рисунку представлено схематичне зображення спектра CAP-модульованого RADSL сигналу.

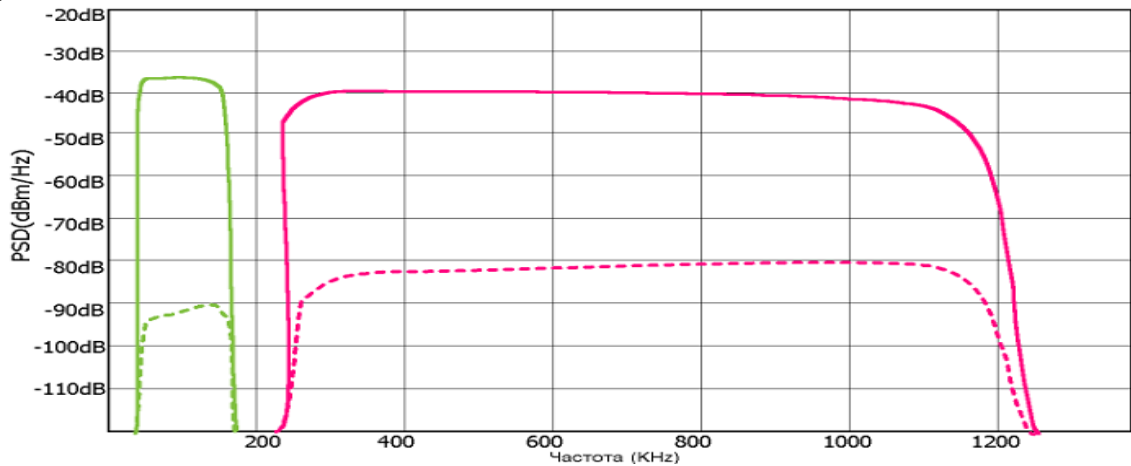


Рисунок 3.7 - Схематичне зображення спектра CAP-модульованого RADSL сигналу.

Зеленим кольором на цьому рисунку позначений спектр переданого користувачем сигналу (Upstream). Червоним кольором - спектр сигналу, що приймається користувачем (Downstream). Пунктирною лінією на малюнку позначені рівні перехресних перешкод, що викликані передачею сигналів такого ж типу по всім іншим 49 парам проводів даного кабелю і реєструються на ближньому кінці NEXT.

Таблиця 3.2- Залежність відносного співвідношення сигнал/шум SNR\* від типу використовуваного алгоритму CAP

Тип кода	SNR*(dB)
CAP-4	14.5
CAP-8	18.0
CAP-16	21.5
CAP-32	24.5
CAP-64	27.7
CAP-128	30.6
CAP-256	33.8

Приведена таблиця 3.2 представляє залежність відносного співвідношення сигнал/шум SNR\* від типу використовуваного алгоритму CAP. Відповідно до визначення значення відносного співвідношення SNR\* відповідає рівневі перешкоди, при якій BER у прийнятого сигналу не буде перевищувати значення  $10^{-7}$ . Звертає на себе увагу той факт, що, як і у випадку QAM, завадостійкість алгоритму модуляції зменшується при підвищенні його спектральної ефективності.

#### Максимальна дальність роботи апаратури

Як вже наголошувалося, загасання в кабелі пропорційно частоті сигналу, тому сигнал CAP, спектр якого не має складових вище 260 кГц, розповсюджується на більшу дистанцію, ніж сигнал з кодом 2B1Q або HDB3. В умовах, коли вихідна потужність в системах HDSL обмежена

стандартами (+13,5 дБ), а чутливість приймача через шуми не може перевищувати -43 дБ, зниження частоти лінійного сигналу збільшує дальність роботи систем HDSL CAP в порівнянні з 2B1Q. Для систем, що працюють по двох парах (див. таблицю), вигреш складає 15-20% (для жили 0,4-0,5 мм), для систем SDSL (працюючих по одній парі) - 30...40%. Дальність передачі (без регенераторів), що досягається в HDSL CAP, вище дальності роботи лінійного тракту ІКМ-30 (HDB-3) на 350-400%.

*Висока завадостійкість і не чутливість до групового часу затримки*

Зважаючи на відсутність в спектрі високочастотних (понад 260 кГц) і низькочастотних (нижче 40 кГц) складових, технологія CAP нечутлива до високочастотних наведень (перехресні завади, радіоінтерференція) і імпульсних шумів, так само, як і до низькочастотних наведень і спотворень, наприклад, при запуску потужних електричних машин (ж/д, метро) або електрозварюванні. Оскільки ширина спектру складає лише 200 кГц, не виявляються ефекти, що викликаються груповим часом затримки.

*Мінімальний рівень створюваних перешкод і наведень на сусідні пари*

Сигнал CAP не викликає інтерференції (взаємовплив) і перешкод в спектрі звичайного (аналогового) телефонного сигналу, оскільки в спектрі немає складових нижче 4 кГц. Це знімає обмеження на використання сусідніх пар для звичайних (аналогових) абонентних або міжстанційних з'єднань.

*Сумісність з апаратурою ущільнення, що працює по сусідніх парах*

Більшість аналогових систем ущільнення абонентних і сполучних ліній використовує спектр до 1 МГц. Системи з модуляцією CAP можуть викликати наведення на частотні канали в діапазоні 40-260 кГц, проте решта каналів не потрапляє під який-небудь вплив, отже, є можливість використання апаратури HDSL CAP в одному кабелі з аналоговою апаратурою ущільнення. Системи ж HDSL з модуляцією 2B1Q викликають наведення фактично на всі частотні канали аналогових систем ущільнення, що навантажують сусідні пари, тому, як правило, не можуть бути використані в одному кабелі з аналоговою апаратурою ущільнення.

Щоб проілюструвати типові значення дальності роботи систем HDSL, що використовують різні технології лінійного кодування, в таблиці 1 представлені типові дистанції роботи устаткування HDSL WATSON (виробництво Schmid Telecom AG, Швейцарія) різних серій. Устаткування WATSON 2 використовує кодування 2B1Q і працює по двох парах, WATSON 3 використовує CAP-64 і працює також по двох парах, а працююча по одній парі апаратура WATSON 4 застосовує модуляцію CAP-128. Необхідно відзначити, що приведені в таблиці дані є лише типовими значеннями, вимірними на певних кабелях при заданих рівнях шумів (відповідно до стандартів ETSI). У разі, коли приведена в таблиці дальність виявляється не достатньою (довжина лінії, на якій необхідно організувати цифровий тракт, перевищує типові значення), застосовується регенератор. Його організують з двох блоків HDSL, сполучених "спина до спини", або виконують в спеціальному корпусі як особливий пристрій. Регенератор подвоює робочу дистанцію, на одній лінії теоретично можливе використання до 7-8 регенераторів.

Таблиця 3.3 - Характерна дистанція роботи систем HDSL і SDSL WATSON

Діаметр жили	Допустима довжина лінії без регенераторів		
	WATSON 2 (2B1Q)	WATSON 3 (CAP-64)	WATSON 4 (CAP-128)
0,4 мм	до 4 км	4-5 км	3,0 км
0,6 мм	до 6 км	6-7 км	4,2 км
0,8 мм	до 9 км	до 9 км	6,3 км

При проектуванні мережі дуже важливо на практиці визначити придатність тих або інших кабельних пар до роботи устаткування HDSL. Приблизно оцінити можливість застосування системи HDSL допоможе приведена таблиця. Щоб отримати більш точні результати, слід провести ряд вимірювань, для чого необхідно використовувати спеціальний тестер, що дозволяє генерувати характерні для HDSL значення перехресних завад (NEXT, FEXT), а також перевірити загасання в лінії на характерних частотах. Існує спеціалізоване вимірювальне устаткування, призначене для цієї мети, проте не варто купляти таке дороге устаткування (в десятки разів дорожче пари модемів HDSL) тільки з метою протестувати лінії під застосування систем HDSL. Річ у тому, що значно простіше і дешевше перевірити кабельні пари пробним включенням пари модемів HDSL, що забезпечують повну діагностику відповідно до рекомендації ITU-T G.826. Такий підхід дозволить не тільки на 100% визначити, чи придатна лінія для апаратури конкретного типу (2B1Q, CAP-64 або CAP-128), але і визначити велику кількість якісних характеристик отриманого цифрового тракту (BER, SQ і ін.). Параметри HDSL-лінії, що вимірюються відповідно до G.826, наведені нижче.

#### *Переваги алгоритму*

Оскільки алгоритм амплітудно-фазової модуляції з придушенням несучої є, по суті, алгоритмом типу QAM, йому властиві всі позитивні якості, що властиві цьому класові алгоритмів - відносна простота реалізації і висока спектральна ефективність. Безсумнівною перевагою власне алгоритму CAP є висока енергетична ефективність зформованого сигналу. Саме цей алгоритм теоретично здатний забезпечити максимальні значення співвідношення SNR і, отже, передачу сигналу на найбільшій відстані. Усі ці корисні якості алгоритму модуляції CAP дозволяють застосовувати його для побудови ефективних і економічних приймально-передавальних пристроїв широкого спектра технологій DSL - від SDSL до VDSL.

#### *Недоліки алгоритму*

Основним недоліком цього методу є відсутність стандартизуючого документа, що визначає процедури, відповідно до яких виконується перетворення сигналу. Відсутність цього документа обумовлюється політичними і економічними причинами. Однією з причин, що приводять до стримування впровадження цієї технології, є сильна підтримка альтернативної, стосовно CAP, технології DMT, що робить комітет T1E1 ANST. Іншою причиною є недостатня гнучкість ліцензійної політики, що проводить власник патенту на CAP компанія GlobalSpan. Ці причини, які не можна назвати технічними в той же час є досить вагомими для того, щоб стримувати процеси впровадження алгоритму CAP у перспективні системи DSL.

### **3.3 Кодування QAM**

#### *Опис алгоритму*

Алгоритм амплітудної модуляції (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) квадратури є різновидом багатопозиційної амплітудно-фазової модуляції. Цей алгоритм широко використовується при побудові сучасних модемів ТЧ [7].

При використуванні даного алгоритму передавачий сигнал кодується одночасними змінами амплітуди синфазної (I) і квадратурної (Q) компоненти несучого гармонійного коливання ( $f_c$ ), які зсунуті по фазі один відносно іншого на  $\pi/2$  радіану. Результируючий сигнал  $Z$  формується при сумуванні цих коливань. Таким чином, QAM –модульований дискретний сигнал може бути представлено співвідношенням:

$$Z_m(t) = I_m \cdot \cos(2\pi f_c t) + Q_m \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

де:

$t$  - змінюється в діапазоні  $\{(m - 1) \cdot \Delta t \dots m \cdot \Delta t\}$ ;

$m$  - порядковий номер дискрету часу;

$\Delta t$  - крок квантування вхідного сигналу за часом;

$p$  - крок квантування вхідного сигналу по амплітуді;

$\alpha_m$  і  $\beta_m$  - модуляційні коефіцієнти;

$$I_m = \alpha_m * P, \quad Q_m = \beta_m * P.$$

Цей же сигнал також може бути представлено в комплексному вигляді:

$$Z = I + j \times Q,$$

$$Z_m = A_m \exp(2\pi f_c + \varphi_m) \quad \text{або}$$

де  $A_m = \sqrt{Q_m^2 + I_m^2}$  - алгоритм зміни амплітуди модульованого сигналу

$\varphi_m = \arctg(Q_m / I_m)$  - алгоритм зміни фази модульованого сигналу.

Таким чином, при використанні квадратурної амплітудної модуляції передаюча інформація кодується одночасними змінами амплітуди і фази несучого коливання. На рисунку 3.8 представлено принцип формування результуючого коливання  $Z$  (вектор відзначений зеленим кольором) шляхом складання вектора квадратурної складової  $Q$  (відзначено зеленим кольором) з вектором синфазної складової  $I$  (на рисунку він відзначений синім кольором). Амплітуда вектора  $Z$  визначається співвідношенням  $A_r$ , а кут, який цей вектор утворює з віссю абсцис, визначається співвідношенням  $\varphi_m$ .

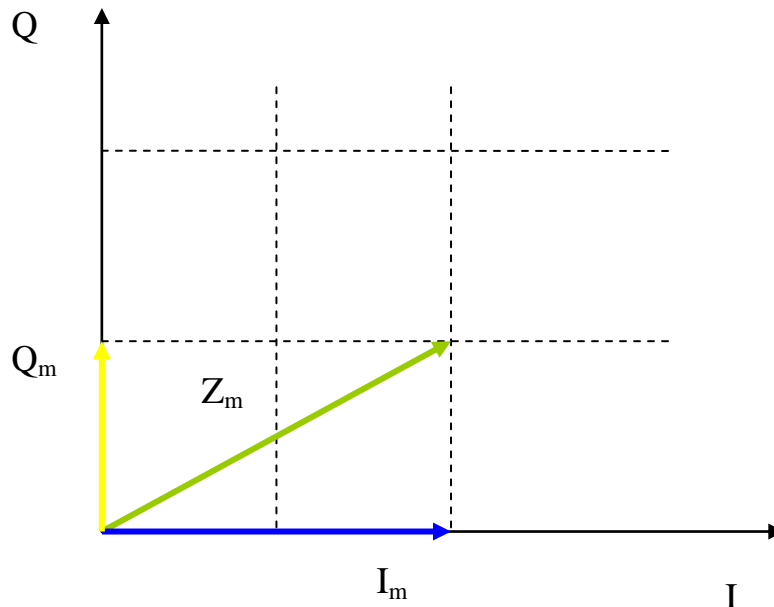


Рисунок 3.8 – Принцип формування результуючого коливання

Для даного алгоритму істотно, що при модулюванні синфазної і квадратурної складової несучого коливання використовується те саме значення дискретної зміни амплітуди.

Тому закінчення векторів модульованого коливання утворюють прямокутну сітку на фазовій площині дійсної -  $\text{Re}\{Z\}$  і уявної складової вектора модульованого сигналу -  $\text{Im}\{Z\}$ . Число вузлів цієї сітки визначається типом алгоритму QAM. Схему розташування вузлів на фазовій площині модульованого сигналу QAM коливання прийнято називати сузір'ям (constellation).

Для вказівки типу алгоритму QAM прийнята наступна схема позначення:

**QAM-<число >**

"число" звичайно являє собою значення виду  $2^N$  і відповідає кількості вузлів на фазовій сітці, а також максимальній кількості різних значень вектора модульованого сигналу. Слід

значити, що в даному випадку значення  $N$  відповідає показникові спектральної ефективності використовуваного алгоритму. На малюнку приведена упрощена структурная схема формувача QAM-модульованого сигналу. На першому етапі перетворення послідовність бітів  $D$   $\{d_0, d_1 \dots d_k\}$ , що надходить від джерела сигналу, перетвориться в послідовність двовимірних модуляційних символів  $M$   $\{m_0, m_1 \dots m_j\}$ . Число бітів у цьому символі дорівнює значенню  $N$  (для алгоритму QAM-16  $N=\log_2 16=4$ ).

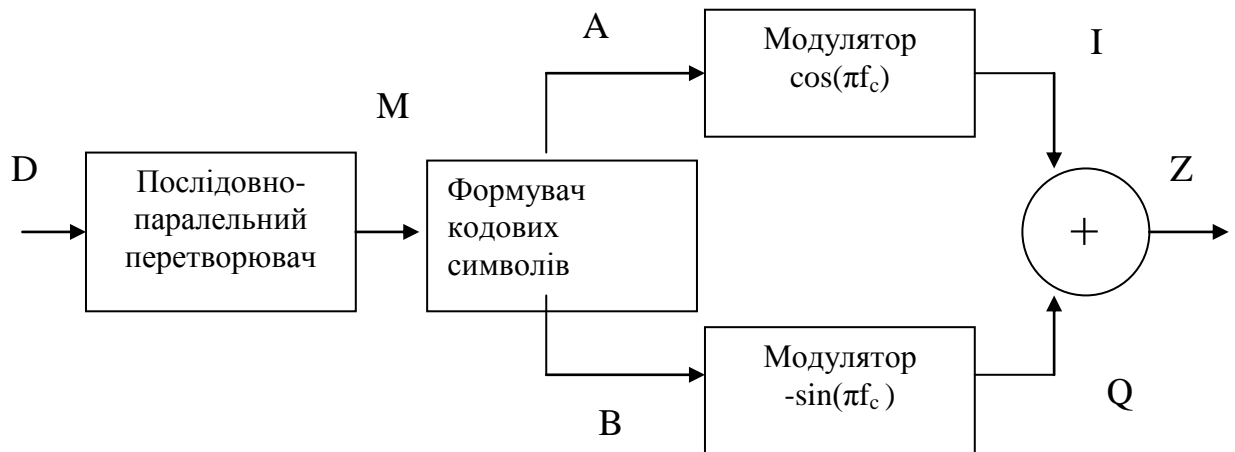


Рисунок 3.9 – Схема формування кодових символів

Формувач кодових символів перетворить двовимірний кодовий символ  $m_j$  на пару кодових символів  $\alpha_j$  і  $\beta_j$ . Для алгоритму QAM-16 припустимі значення  $\alpha_j$  і  $\beta_j$  належать множині  $\{1, 3, -1, -3\}$  і визначають відповідно значення дійсної і уявної координати вектора модульованого коливання. Сформовані значення  $A$   $\{\alpha_i\}$  і  $B$   $\{\beta_j\}$  використовуються для амплітудної модуляції синфазної  $I$  і *квадратури*  $Q$  складових несучого коливання. На останньому етапі перетворення виконується сумування цих коливань і формування результуючого сигналу  $Z$ .

На приведеному нижче рисунку 3.10 представлено розташування векторів модульованого коливання - сузір'я для алгоритму QAM-16. Червоним кольором відзначені значення модуляційних символів, яким відповідають вказані крапки на фазовій площині модульованого коливання  $\{m_3, m_2, m_1, m_0\}$ . Для алгоритму QAM-16 пара  $\{m_3, m_2\}$  визначає номер квадрата фазової площини або знаки дійсної і уявної координати вектора модульованого коливання:

- 00  $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=1$
- 10  $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=-1$
- 01  $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=-1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=1$
- 11  $\text{Sign}(\text{Re}\{Z\})=-1, \text{Sign}(\text{Im}\{Z\})=-1$

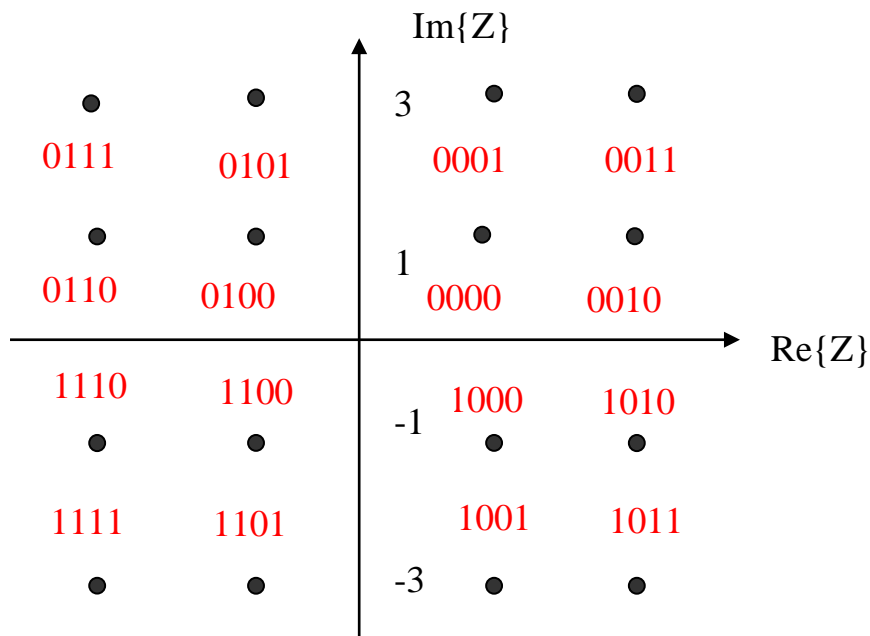


Рисунок 3.10 – Вектори модульованого коливання для QAM-16

Таблиця 3.4– Значення кодових символів  $\alpha$  і  $\beta$  які відповідають молодшим розрядам  $\{m_1, m_0\}$

$m_1$	$m_0$	$\alpha_1$	$\beta_1$
0	0	1	1
0	1	1	3
1	0	3	1
1	1	3	3

Для цього алгоритму пара  $\{m_1, m_0\}$  визначає значення амплітуди дійсної і уявної координати вектора модульованого коливання відповідно. В таблиці представлені значення кодових символів  $\alpha$  і  $\beta$  які відповідають значенням молодших розрядів модуляційного символу  $\{m_1, m_0\}$ . Перетворення модуляційних символів в кодові символи виконується із застосуванням алгоритмів Грея для завадостійкого кодування даних. Так векторам модульованого коливання, які знаходяться близько один від одного на фазовій площині, ставляться у відповідність значення кодових символів, які відрізняються значеннями тільки одного біта. Як приклад, можуть бути розглянуто два вектори  $Z=l+j$  і  $Z=l+3j$ , якими відповідають кодові символи  $\{0,0\}$  і  $\{0,1\}$ .

#### Характеристика алгоритму

В даний час найбільшого розповсюдження отримали декілька варіантів QAM: алгоритм модуляції QAM-4, який кодує інформаційний сигнал зміною фази несучого коливання з кроком  $\pi/2$ . Цей алгоритм модуляції має назву QPSK (Quadrature Phase Shift Keying – квадратурно фазова маніпуляція). Велике розповсюдження отримали також алгоритми QAM-16, 32, 64, 128 і 256. Алгоритм квадратурно амплітудної модуляції, по суті, є різновидом алгоритму гармонійної амплітудної модуляції і тому володіє наступними важливими властивостями:

- ширина спектру QAM модульованого коливання не перевищує ширину спектру модулюючого сигналу;
- положення спектру QAM модульованого коливання в частотній області визначається номіналом частоти несучого коливання;

Ці корисні властивості даного алгоритму забезпечують можливість побудови на його основі високошвидкісних ADSL систем передачі даних по двохдротяній лінії з частотним розділенням

інформаційних потоків, що приймаються (downstream) і передаються (upstream). Конкретна реалізація алгоритму QAM визначає значення наступних параметрів:

- розмірність модуляційного символу ( $\log_2$  кількості точок сузір'я)  $N$  [біт]
- значення символної швидкості  $f_{Symbol}$  [Кбод/сек]
- центральна частота (central rate  $f_c$ )

Значення інформаційної швидкості  $V$  - швидкості передачі даних для алгоритму QAM - визначається наступним співвідношенням:

$$V = N * f_{Symbol}$$

Проект стандарту T1.413 ANSI наказує використання наступних значень символних швидкостей в ADSL - системах передачі даних:

DOWNSTREAM	UPSTREAM
$f_{Symbol}$	$f_{Symbol}$
136 кбод	
170 кбод	85 кбод
340 кбод	136 кбод
680 кбод	
952 кбод	
1088 кбод	

Таким чином, при використанні символної швидкості 136 Kbaud, алгоритм QAM-256 дозволяє забезпечити передачу даних із швидкістю 1088 Кбіт/сек. Центральна частота  $f_c$  для конкретної реалізації алгоритму модуляції визначається співвідношенням

$$f_n + f_{Symbol}/2 \leq f_c \leq f_B - f_{Symbol}/2, \text{ де}$$

$f_n$  - нижня межа спектру модульованого сигналу

$f_{Symbol}$  - значення символної швидкості

$f_B$  - верхня межа спектру модульованого сигналу.

#### Енергетичний спектр сигналу

Параметри огинаючих ліній (масок) енергетичних спектрів модульованих сигналів ADSL приведені в стандарті T1.413 ANSI. Використовування цих масок забезпечує необхідний рівень електромагнітної сумісності сигналів різної природи, які передаються по різних парах в одному кабелі. Незалежно від типу алгоритму модуляції, що використовується, енергетичний спектр модульованого сигналу не повинен виходити за межі встановленої маски (рисунки 3.11).

Характерні для даної маски частотні діапазони приведені в таблиці 3.5:

Таблиця 3.5 – Частотні діапазони вихідного потоку ADSL

№	$f_{поч}$ (кГц)	$f_{кін}$ (кГц)	PSD (dB/Гц)
1	0	4	-97.5
2	25.875	138	-34.5
3	3093	4545	-90



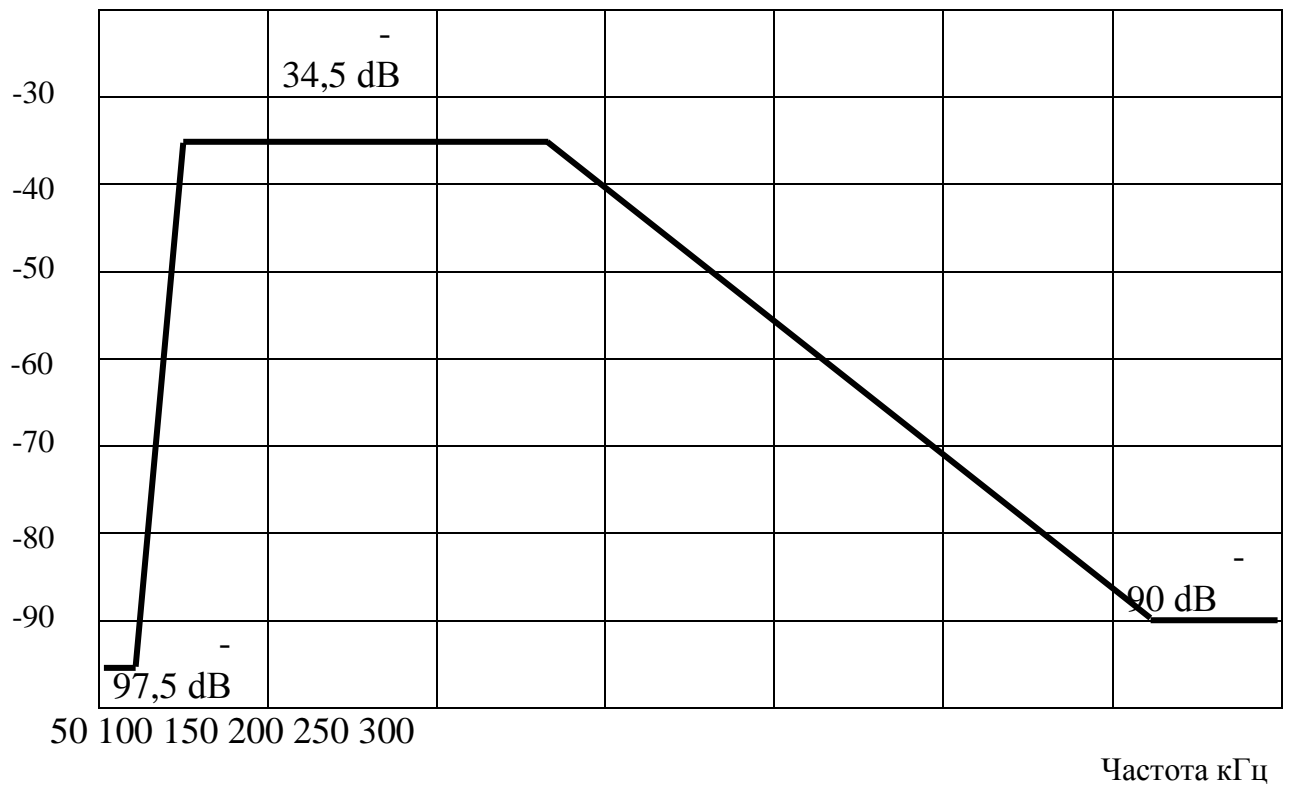


Рисунок 3.11 - Маски для вихідного (UPSTREAM) потоку ADSL.

Діапазон №1 не використовується для передачі даних в технології ADSL. В діапазоні №2 повинна бути розміщений основна частина спектру корисного сигналу. Діапазон №3 не використовується для передачі висхідного потоку даних ADSL і прийому вхідного потоку. Приблизно таку ж форму має маска для вхідного (DOWNSTREAM) потоку ADSL (рисунок 3.12).

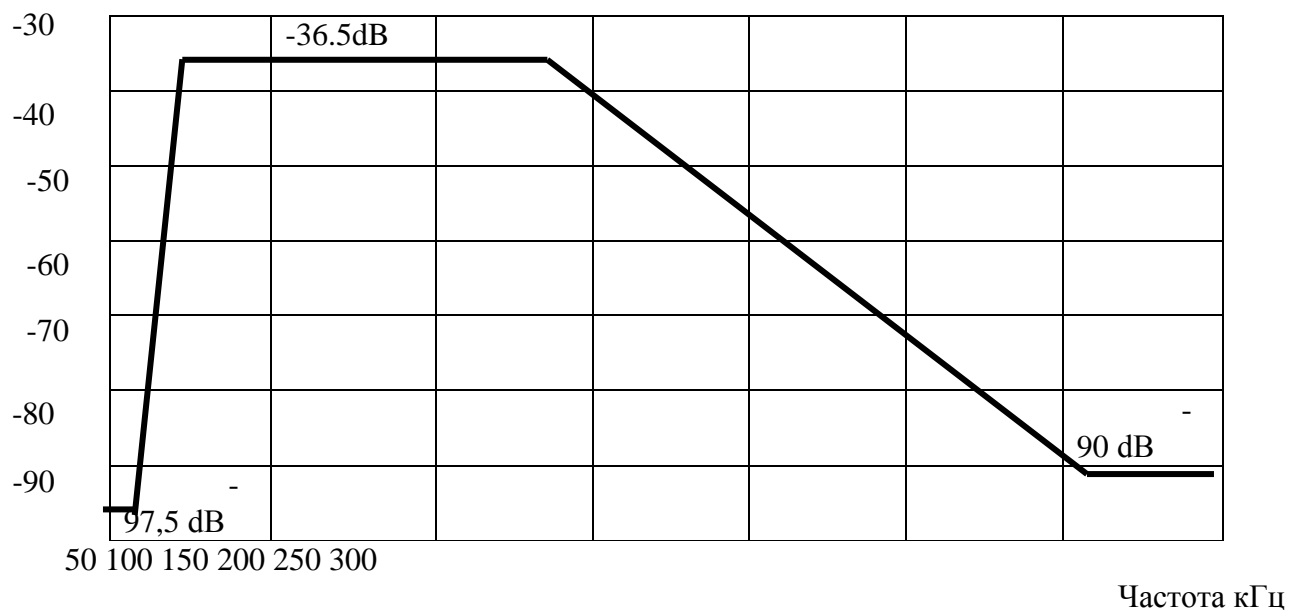


Рисунок 3.12 - Маски для вхідного (DOWNSTREAM) потоку ADSL

Характерні маски вхідного потоку ADSL частотні діапазони приведені в таблиці 3.6:

Таблиця 3.6 – Частотні діапазони вхідного потоку ADSL

№	$f_{\text{поч}}$ (кГц)	$f_{\text{кін}}$ (кГц)	PSD (дБ/Гц)
1	0	4	-97,5
2	4	138	92,5,-44,2
3	138	1104	36,5

Діапазон №1 не використовується для передачі даних в технології ADSL. Діапазон №2 не використовується для прийому вхідного потоку даних ADSL і призначений для передачі вхідного потоку. В діапазоні №3 має бути розміщений основна частина спектру корисного сигналу. Алгоритм модуляції QAM може бути використаний для формування лінійного сигналу VDSL- пристроїв. На приведеному нижче рисунку представлено схематичне зображення спектру сигналу QAM-16, який забезпечує передачу даних із швидкістю 26 Мбіт/сек - (6.5 Мбод). Представлений графік був отриманий на дводротяній лінії завдовжки 1300 метрів (4000 ft). Ця лінія мала перетин 0.5 мм (26 AWG) і пасивне відгалуження (bridge-tap) завдовжки близько 10 метрів (30 ft).

Наявність пасивних відведень на лінії при використанні алгоритму модуляції QAM є одним з чинників, які призводять до істотного зменшення значення співвідношення сигнал/шум (SNR) у сигналі, що приймається.

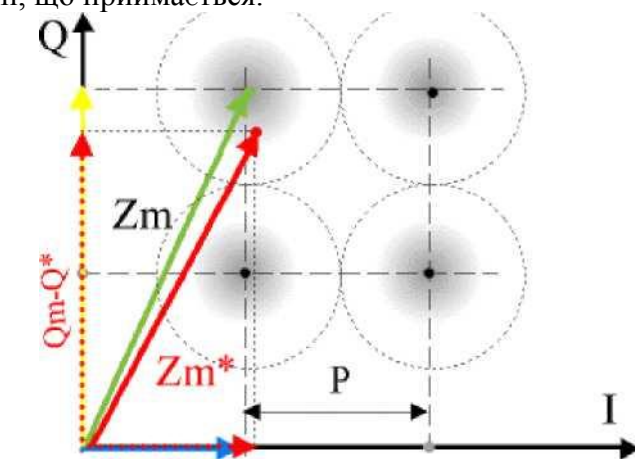


Рисунок 3.13 - Завадостійкість алгоритму QAM

Завадостійкість алгоритму QAM обернено пропорційна до його спектральної ефективності. Вплив завад призводить до виникнення неконтрольованих змін амплітуди і фази переданого по лінії сигналу. При збільшенні числа кодових крапок на фазовій площині відстань між ними  $P$  зменшується і, отже, зростає імовірність помилкового розпізнавання перекрученого прийнятого вектора  $Z_m^*$  на приймальній стороні (рисунок 3.13). Граничний рівень припустимих амплітудних і фазних перекручувань модульованого QAM сигналу являє собою коло діаметром  $P$ . Центр цього кола збігається з вузлом квадратурної сітки на фазовій площині. Заштриховані області на малюнку відповідають координатам перекрученого вектора модульованого QAM-коливання при впливі на корисний сигнал перешкоди, відносний рівень якої визначається співвідношенням  $20\text{dB} \leq \text{SNR} \leq 30\text{dB}$ .

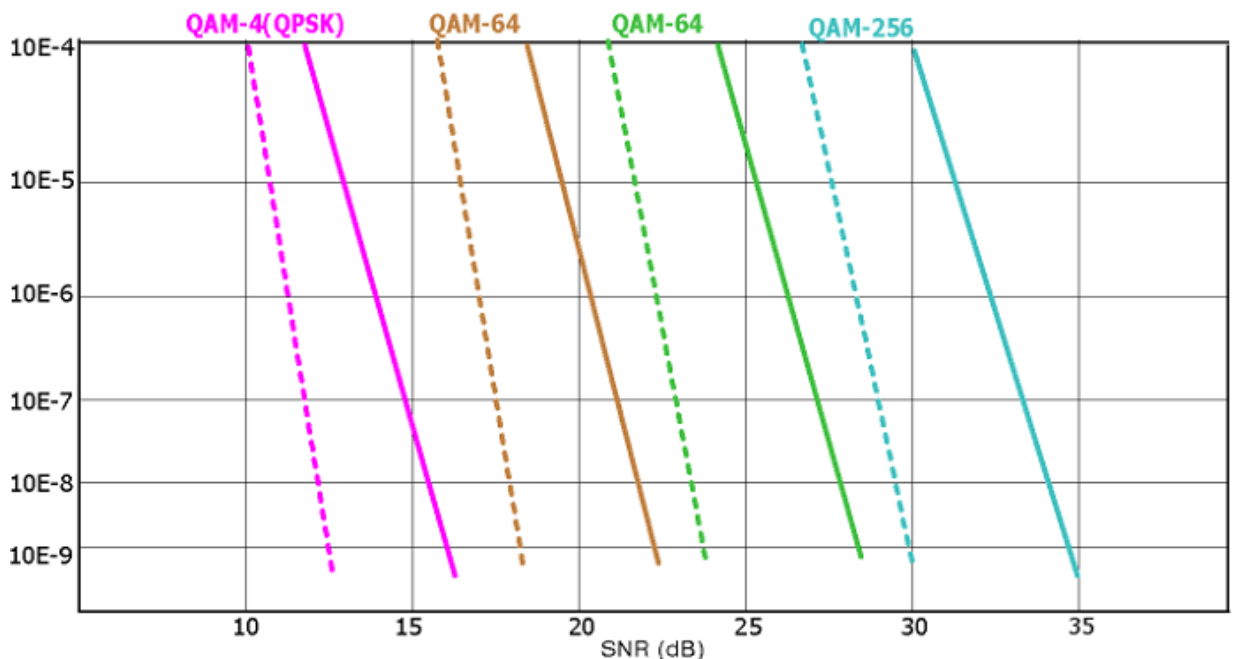


Рисунок 3.14 – Залежності очікуваного значення BER (Bit Error Rate) від співвідношення SNR для різних варіантів алгоритму QAM-модуляції.

На діаграмі, що приведена вище (рисунок 3.14), лініями представлені залежності очікуваного значення BER (Bit Error Rate) від співвідношення SNR для різних варіантів алгоритму QAM-модуляції. Використання додаткового кодування (пунктирні лінії), наприклад, по алгоритму Ріда-Соломона (Reed-Solomon) дозволяє підвищити завадостійкість модульованого сигналу.

#### *Переваги алгоритму*

Алгоритм квадратурної амплітудної модуляції є відносно простим для реалізації і в той же час досить ефективним алгоритмом лінійного кодування xDSL сигналів. Сучасні реалізації цього алгоритму забезпечують досить високі показники спектральної ефективності. Як уже було відзначено вище, обмеженість спектра, відносно високий рівень завадостійкості QAM-модульованого сигналу забезпечують можливість побудови на основі цієї технології високошвидкісних ADSL і VDSL систем передачі даних по двупровідній лінії з частотним поділом прийнятого і переданого інформаційних потоків.

#### *Недоліки алгоритму*

До недоліків алгоритму можна віднести відносно невисокий рівень корисного сигналу в спектрі модульованого коливання. Цей недолік є загальним для алгоритмів гармонійної амплітудної модуляції і виражається в тому, що максимальну амплітуду в спектрі модульованого коливання має гармоніка з частотою несучого коливання. Тому даний алгоритм у чистому виді досить рідко використовується на практиці. Набагато більшого поширення одержують алгоритми, що використовують основні принципи QAM і в той же час вільні від його недоліків (наприклад - алгоритм CAP).

### **3.4 Метод кодування DMT**

Всупереч існуючій думці, багаточастотний алгоритм discrete tone (DMT) не є принципово новим. Основні положення цього алгоритму модуляції були сформульовані і запатентовані фахівцями Amati Communications (у даний момент ця компанія є частиною Texas

Instruments Internet Access group) ще на початку 1990 років. У 1993 році технологія була обрана ANSI як алгоритм лінійного кодування для перспективних систем передачі даних. Складність технічної реалізації даного алгоритму на первісному етапі розвитку DSL - технологій обмежувала область його можливого застосування. Однак на даний момент алгоритм DMT має чисельні технічні реалізації і є одним з основних алгоритмів модуляції найбільш перспективних технологій ADSL і VDSL [7].

*Опис алгоритму*

Алгоритм DMT побудований за принципово іншою, ніж у представлених вище алгоритмів, схемі. На відміну від алгоритмів QAM, даний алгоритм використовує не одну, а групу частот несучих коливань. При використанні цього алгоритму модуляції весь розрахунковий частотний діапазон лінії поділяється на кілька ділянок шириною по 4.3125 кГц. Кожна з цих ділянок використовується для організації незалежного каналу передачі даних. На приведеному нижче рисунку 3.15 представлений варіант частотної організації вхідного потоку стандарту "echo cancellation". Для даного варіанта в напрямку абонента організується 249 частотних каналів. Крім того, для цього варіанту характерно, що частотні діапазони, що використовуються для передачі даних вхідного і вихідного інформаційних потоків перекриваються.

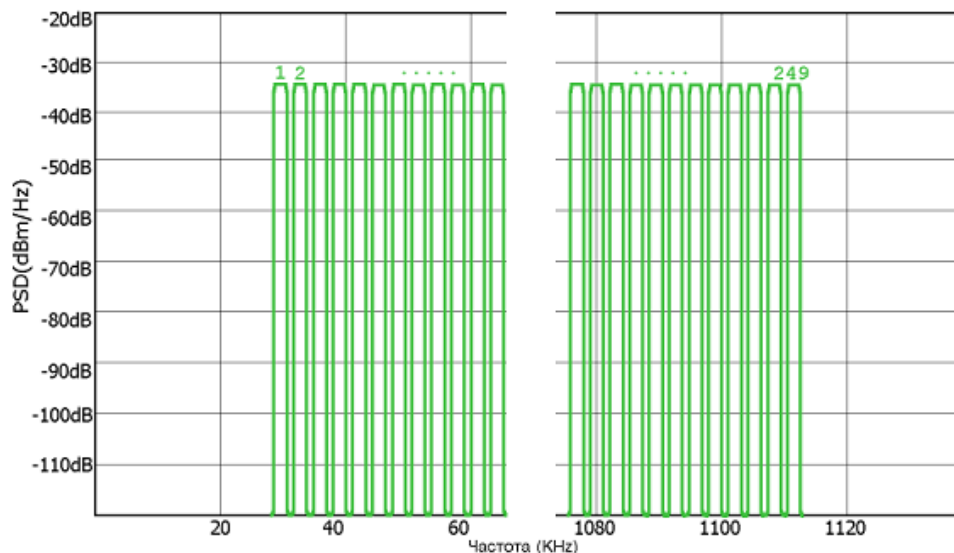


Рисунок 3.15 – Організація вхідного потоку "echo cancellation".

На приведеному нижче рисунку 3.16 представлено варіант частотної організації вхідного потоку G.DMT.

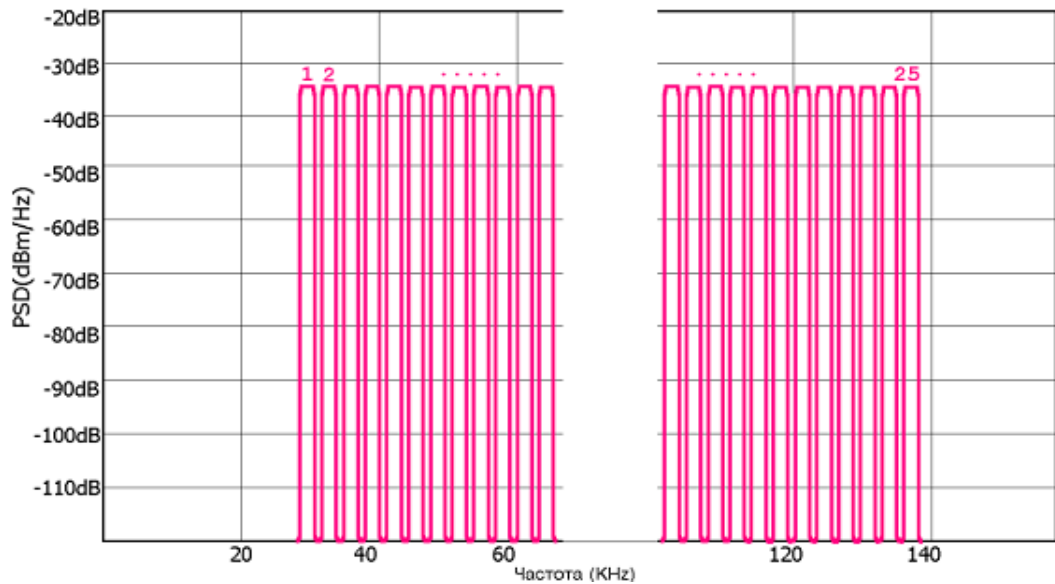


Рисунок 3.16 - Організації вхідного потоку G.DMT.

На етапі перевірки якості лінії передавач, виходячи з рівня перешкод у частотному діапазоні ділянки, для кожного з цих каналів вибирає підходящу модуляційну схему. На чистих каналах з малим рівнем шумів можуть бути використані алгоритми з великими значеннями  $\theta$ , наприклад, QAM 64, у той час, як на більш зашумлених ділянках можуть бути використані більш прості алгоритми модуляції, наприклад QPSK. Очевидно, що використання такого принципу регулювання швидкості передачі даних, дозволяє найбільш точно погоджувати параметри модульованого сигналу з параметрами ліній, по якій він буде передаватися. При передачі даних, інформація розподіляється між незалежними каналами пропорційно їхньої пропускної здатності, приймач виконує операцію демультимплексування і відновлює вихідний інформаційний потік. Рисунки, що приведені нижче, ілюструють описаний вище процес адаптації (рисунки 3.17, 3.18).

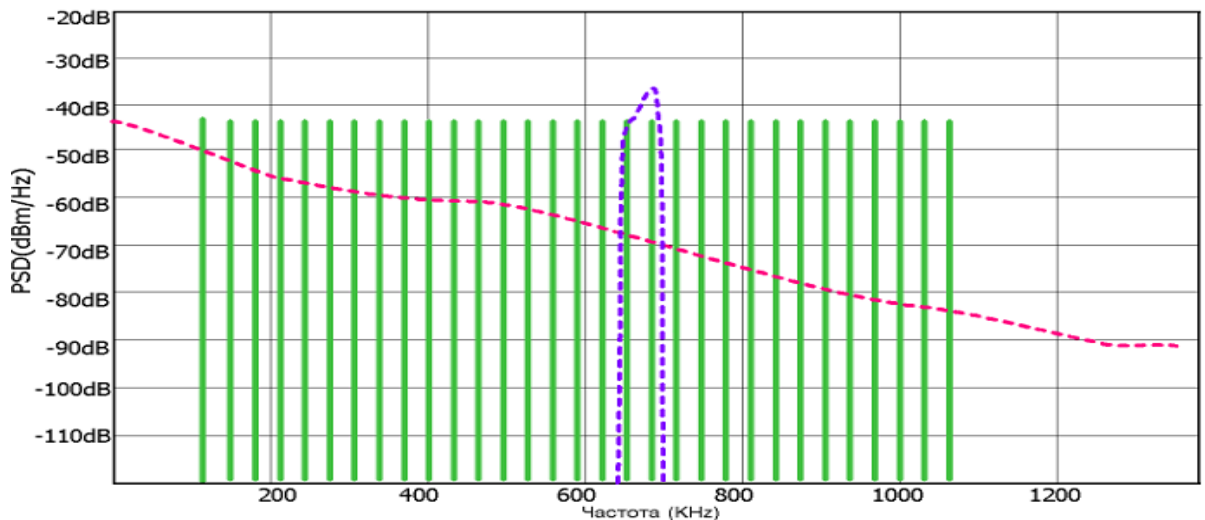


Рисунок 3.17 - Демультимплексування і відновлення вихідного інформаційного потоку

На представленому вище рисунку, зеленим кольором, позначена неадаптована частотна характеристика DMT-передавача. Червоним кольором виділена крива загасання в лінії від частоти переданого сигналу. Лінією синього кольору позначена частотна перешкода, що постійно діє в порівняно невеликій ділянці в межах робочого діапазону частот передавача.

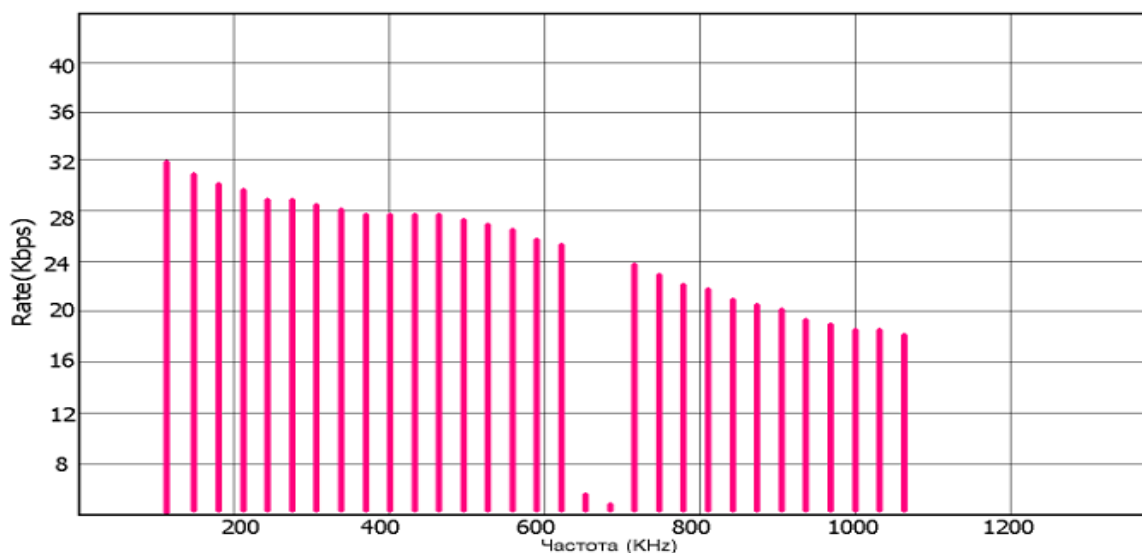


Рисунок 3.18 - Відновлений вихідний інформаційний потік

Після виконання операцій узгодження пропускної здатності елементарних каналів із приведеними частотними характеристиками лінії, залежність швидкостей передачі даних від частотного номера елементарного каналу буде відповідати кривим, що приведені на попередньому рисунку.

#### *Переваги алгоритму*

Алгоритм модуляції DMT являє собою подальший розвиток ідеї, що була покладена в основу алгоритмів QAM. У силу цього, він, безумовно, здатний забезпечити високу швидкість і надійність передачі даних. До додаткових переваг цього алгоритму, безумовно, відносяться можливість оперативної і точної адаптації приймально-передавальних пристроїв до характеристик лінії і практично повсюдне визнання цього алгоритму стандартизуючими організаціями (у першу чергу - ANSI).

#### *Недоліки алгоритму*

Недоліками алгоритму модуляції DMT можна вважати його громіздкість і недостатню технологічність. Алгоритм DMT є найбільш складним для апаратної реалізації серед всіх алгоритмів, що у даний час використовуються для формування лінійного коду пристроїв DSL. У той же час, дискусії про те, наскільки виправдана ця складність і наскільки здатність до адаптації цього алгоритму відповідає характеристикам реальних ліній, після твердження DMT, як основний алгоритм лінійного кодування стандартів ANSI для ADSL і VDSL навряд чи доцільні.

## **ВИСНОВКИ**

Проведено аналіз роботи технології DSL, принцип її побудови. Використання технологій DSL на абонентській телефонній лінії дозволяє перетворити абонентську кабельну мережу в частину мережі високошвидкісної передачі даних, що дає можливість надавати якісні послуги споживачам. Класифіковано типи та стандарти DSL в залежності від методу передачі, режиму роботи, кодування швидкості та визначено методи кодування, які найбільш поширено використовуються у даній технології.

Визначено базові та спеціалізовані параметри абонентських кабелів, які впливають на якості функціонування та передачі даних в мережі DSL.

Досліджено основні методи кодування (2B1Q, CAP, QAM, DMT), які використовуються технологією DSL. Визначено переваги та недоліки даних методів.

Технологія DSL є самим простим та економічним методом широкопasmового існуючого абонентського кабельного господарства для переходу на мережі доступу NGN. Для кінцевих користувачів технології DSL забезпечується високошвидкісне й надійне з'єднання між мережами або з мережею Інтернет, а телефонні компанії одержують можливість виключити потоки даних зі свого комутаційного устаткування, залишаючи його винятково для традиційного телефонного зв'язку.

### **Контрольні запитання для самооцінки рівня знань**

1. В чому полягає різниця між базовими та спеціалізованими параметрами абонентської цифрової лінії.
2. Який максимальний рівень сигналу, що посиляється в ліню.
3. Чим відрізняється симетрична лінія від асиметричної абонентської лінії.
4. Яка максимальна швидкість технології xDSL.
5. Які методи кодування використовуються в xDSL.
6. Як збільшити швидкість передачі інформації за допомогою технології xDSL.

### **Список літератури, рекомендованої для поглибленого вивчення матеріалу**

1. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ, “Техніка”, 2001.- 526 с.
2. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектування телекомунікаційних мереж. Київ, “Техніка”, 2003. – 923 с.
3. Стеклов В.К., Костік Б.Я., Беркман Л.Н. Сучасні системи управління в телекомунікаціях/ За заг. Ред.. В.К Стеклова.- К.: Техніка, 2005.-400с.
4. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. С-Птб., М., Харьков, Минск – “Питер”, 1999. – 895с.
5. Столлингс В. Компьютерные системы передачи данных. Изд. 6-е. М., С-Птб., Киев, “Вильямс”, 2002.- 543с.
6. Бакланов И. Г. ADSL/ADSL2+: Теория и практика эксплуатации. М. Метротек, 2006 – 136с.
9. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. 2изд.-СПб.-Питер, 2005.- 864с.