

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Аналіз технічних принципів технології VDSL2-vectoring та її
використання в мережах доступу»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ТС-21

Каченюк Богдан Миколайович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕКІР, доцент

Носков Вячеслав Іванович _____

Рецензент:

Незалежний експерт з телекомунікацій,

к.т.н. Вахрушев Володимир Платонович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Каченюку Богдану Миколайовичу

1. Тема роботи «Аналіз технічних принципів технології VDSL2-vectoring та її використання в мережах доступу», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912 - С
2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2026 року
3. Вихідні дані до роботи: матеріали статей та наукових видань, інформаційні ресурси мережі Інтернет, навчально-методичні матеріали. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи: Обґрунтувати актуальність теми. Огляд технологій широкосмугового доступу по мідному та оптичному кабелям, навести їх технічні особливості, переваги та недоліки. Зазначити фактори що впливають на роботу DSL-технологій та методи компенсації впливу перехідних завад. Визначити місце VDSL2-технології в сучасній мережі доступу. Проаналізувати технічні принципи технології VDSL2-vectoring. Навести особливості практичного використання VDSL2-vectoring.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

- 1) Тема, мета, об'єкт та предмет дослідження
- 2) Характеристика сучасних технологій доступу, місце VDSL2-технології
- 3) Фактори, що впливають на роботу ліній VDSL2
- 4) Порівняння методів компенсації перехідних завад у VDSL2
- 5) Принцип компенсації перехідних завад у VDSL2-vectoring
- 6) Порівняння ефективності VDSL2 та VDSL2 vectoring
- 7) Порівняння архітектур FTTCab та FTTB із використанням VDSL2 vectoring
- 8) Приклади впровадження VDSL2 vectoring у європейських країнах
- 9) Висновки

6. Дата видачі завдання 31 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд технологій широкосмугового доступу	15.03.2026	Виконано
2	Технічні принципи технології VDSL2-vectoring	30.04.2026	Виконано
3	Практичне застосування VDSL2-vectoring у мережах доступу	20.05. 2026	Виконано
5	Вступ, Висновки	1.06.2026	Виконано
6	Чистовий варіант дипломної роботи, презентація	5.06.2026	Виконано

Студент

Богдан КАЧЕНЮК

Керівник роботи

Вячеслав НОСКОВ

РЕФЕРАТ

Дипломну роботу виконано на 54 аркушах, вона містить перелік посилань на використані джерела з 25 найменувань. У роботі наведено 9 рисунків та 10 таблиць.

Дана дипломна робота присвячена розгляду комплексу технічних принципів та алгоритмів функціонування технології VDSL2-vectoring в сучасних системах фіксованого широкосмугового доступу. У роботі детально проаналізовано еволюційний шлях розвитку стандартів xDSL від базових асиметричних ліній до сучасних високочастотних профілів, виявлено ключові фізичні фактори деградації сигналів у мідних кабельних парах та досліджено математичні моделі лінійної компенсації кростоку. Значну увагу приділено архітектурним рішенням FTTCab та FTTB, аналізу моделей розгортання мереж у міських і сільських умовах України, а також оцінці практичного досвіду провідних європейських телекомунікаційних операторів.

Об'єктом досліджень є технології широкосмугового доступу, що забезпечують високошвидкісну передачу даних та інтеграцію мультимедійних сервісів у сучасних телекомунікаційних мережах.

Предметом досліджень є технічні принципи реалізації технології VDSL2-vectoring (стандарт ITU-T G.993.5), математичні методи (Zero Forcing, MMSE) придушення перехресних завад на дальньому кінці лінії (self-FEXT) та апаратно-програмні вимоги до мультиплексорів IP-DSLAM для оптимізації використання існуючої мідної інфраструктури.

Метою даної дипломної роботи є комплексне дослідження технології VDSL2-vectoring, її техніко-економічне обґрунтування як ефективного проміжного етапу модернізації мереж зв'язку, визначення меж її ефективності залежно від довжини ліній, а також формування рекомендацій щодо її практичного застосування на сегменті «останньої милі». Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. У роботі систематизовано фактори впливу на затухання високочастотних сигналів та доведено, що векторизація

дозволяє збільшити пропускну здатність середньої мідної пари у 2–3 рази на відстанях до 500–800 метрів, досягаючи швидкостей 100–250 Мбіт/с. Обґрунтовано вимоги до апаратної частини вузлів доступу, зокрема щодо обчислювальної потужності DSP-процесорів для реалізації попереднього кодування (precoding) у низхідному та скасування (cancelling) у висхідному потоках даних. Проведено порівняльний аналіз VDSL2-vectoring з альтернативними технологіями (GPON, G.fast, LTE/5G) за критеріями вартості розгортання, швидкості та енергоефективності. На основі аналізу європейського досвіду (Німеччина, Швейцарія) доведено стратегічну доцільність використання гібридних оптико-мідних архітектур для забезпечення стабільного функціонування сервісів Triple Play (IPTV, VoIP, швидкісний Інтернет) без значних капітальних витрат на початкових етапах модернізації мережі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: VDSL2-VECTORING, ШИРОКОСМУГОВИЙ ДОСТУП, ОСТАННЯ МИЛЯ, ПЕРЕХРЕСНІ ЗАВАДИ (FEXT), ЛІНІЙНА КОМПЕНСАЦІЯ, МАТРИЧНІ МЕТОДИ, ZERO FORCING, MMSE, MULTIPLEXER IP-DSLAM, АРХІТЕКТУРА FTTCab, АРХІТЕКТУРА FTTB, СЕРВІСИ TRIPLE PLAY, МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕРЕЖ.

ABSTRACT

The thesis is individual work, consisting of 54 pages, contains 25 bibliographic references. The work includes 9 figures and 10 tables.

The diploma thesis is devoted to the comprehensive consideration of technical principles and operational algorithms of VDSL2-vectoring technology within modern fixed broadband access systems. The work analyzes in detail the evolutionary path of xDSL standards from basic asymmetric lines to modern high-frequency profiles, identifies key physical factors of signal degradation in copper cable pairs, and investigates mathematical models of linear crosstalk mitigation. Significant attention is paid to FTTCab and FTTB architectural solutions, the analysis of network deployment models in urban and rural conditions of Ukraine, and the evaluation of the practical experience of leading European telecommunication operators.

The object of research is broadband access technologies that provide high-speed data transmission and multimedia services integration in modern telecommunication networks.

The subject of research is the technical principles of VDSL2-vectoring implementation (ITU-T G.993.5 standard), mathematical methods (Zero Forcing, MMSE) of far-end crosstalk suppression (self-FEXT), and hardware-software requirements for IP-DSLAM multiplexers to optimize the utilization of the existing copper infrastructure.

The purpose of this diploma thesis is a comprehensive study of VDSL2-vectoring technology, its technical and economic substantiation as an effective intermediate stage of communication network modernization, determination of its efficiency boundaries depending on line length, and formulation of recommendations for its practical application on the "last mile" segment.

Scientific novelty and practical significance of the obtained results. The work systematizes the factors influencing high-frequency signal attenuation and proves that vectoring allows increasing the throughput of an average copper pair by 2–3 times at distances up to 500–800 meters, reaching speeds of 100–250 Mbps. The requirements

for the hardware component of access nodes are substantiated, specifically regarding the computational power of DSP processors for implementing precoding in downstream and cancelling in upstream data flows. A comparative analysis of VDSL2-vectoring with alternative technologies (GPON, G.fast, LTE/5G) was conducted based on the criteria of deployment cost, speed, and energy efficiency. Based on the analysis of European experience (Germany, Switzerland), the strategic feasibility of using hybrid fiber-copper architectures to ensure stable functioning of Triple Play services (IPTV, VoIP, high-speed Internet) without significant initial capital expenditures for network modernization is proved.

KEYWORDS: VDSL2-VECTORING, BROADBAND ACCESS, LAST MILE, CROSSTALK (FEXT), LINEAR MITIGATION, MATHEMATICAL METHODS, ZERO FORCING, MMSE, MULTIPLEXER IP-DSLAM, FTTCab ARCHITECTURE, FTTB ARCHITECTURE, TRIPLE PLAY SERVICES, NETWORK MODERNIZATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	12
1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ.....	14
1.1 Еволюція технологій DSL (ADSL, ADSL2+, VDSL, VDSL2).....	14
1.2 Альтернативні технології: GPON, Ethernet FTTH, HFC.....	16
1.3 Порівняння: швидкість, дальність, вартість, енергоефективність	19
1.4 Проблема використання існуючих середніх кабельних пар	21
1.5 Потрібне вдосконалення VDSL2 для векторизації	22
Висновки до розділу 1	23
2 ТЕХНІЧНІ ПРИНЦИПИ ТЕХНОЛОГІЇ VDSL2-VECTORING	24
2.1 Принцип роботи VDSL2	24
2.2 Фактори, що впливають на роботу VDSL2-ліній.....	26
2.3 Математична модель перехідних завад та принцип лінійної компенсації	29
2.4 Огляд методів компенсації перехідних завад (vectoring, Zero-Forcing, MMSE)	30
2.5 Технічні принципи компенсації перехідних завад за технологією VDSL2 vectoring. Стандарт ITU-T G.993.5 (self-FEXT cancellation).....	32
2.6 Вимоги до обладнання із підтримкою VDSL2 vectoring	34
2.7 Порівняння ефективності VDSL2-vectoring з традиційним VDSL2 та переваги на середніх відстанях	38
2.8 Перспективи подальшого розвитку (Supervectoring).....	40
Висновки до розділу 2	41
3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ VDSL2-VECTORING В МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ	42
3.1 Типові архітектури побудови мереж доступу з використанням VDSL2-vectoring.....	42
3.2 Моделі розгортання у міських та сільських умовах	44
3.3 Приклади використання в європейських країнах.....	47

Висновки до розділу 3	49
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ADSL – Asymmetric Digital Subscriber Line – асиметрична цифрова абонентська лінія.

DSL – Digital Subscriber Line – цифрова абонентська лінія.

DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexer – мультиплексор доступу цифрових абонентських ліній.

FTTCab – Fiber to the Cabinet – оптичне підключення до вуличного розподільчого вузла.

FTTB – Fiber to the Building – оптичне підключення до будівлі.

FTTH – Fiber to the Home – оптичне підключення до квартири/будинку.

FEXT – Far-End Crosstalk – перехресні завади на дальньому кінці лінії.

NEXT – Near-End Crosstalk – перехресні завади на ближньому кінці лінії.

GPON – Gigabit Passive Optical Network – гігабітна пасивна оптична мережа.

IPTV – Internet Protocol Television – телебачення за протоколом IP.

ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector – Міжнародний союз електрозв'язку, сектор стандартизації.

LTE – Long Term Evolution – стандарт мобільного зв'язку четвертого покоління.

MSE – Minimum Mean Square Error – метод мінімізації середньоквадратичної похибки.

PVC – Permanent Virtual Circuit – постійний віртуальний канал.

QoS – Quality of Service – якість обслуговування.

SNR – Signal-to-Noise Ratio – співвідношення сигнал/шум. Supervectoring (35b) – розширений профіль VDSL2 із частотним діапазоном до 35 МГц. Triple Play – інтеграція трьох сервісів: інтернет, IPTV та VoIP.

VDSL2 – Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line 2 – цифрова абонентська лінія другого покоління з дуже високою швидкістю.

VoIP – Voice over Internet Protocol – передавання голосу через IP-мережі.

XGS-PON – 10 Gigabit Symmetric Passive Optical Network – симетрична пасивна оптична мережа зі швидкістю до 10 Гбіт/с.

ZF – Zero-Forcing – метод компенсації перехресних завад шляхом інверсії матриці каналу.

ВСТУП

Розвиток інформаційних технологій та цифрової економіки зумовлює постійне зростання потреби у високошвидкісному доступі до мережі Інтернет. Сучасні користувачі активно застосовують сервіси, що потребують значної пропускної здатності: потокове відео у форматі Ultra HD, інтерактивні онлайн-ігри, дистанційне навчання, хмарні платформи та сервіси відеоконференцій. У цих умовах широкосмуговий доступ стає базовою інфраструктурою для розвитку суспільства та економіки.

Більшість існуючих кабельних ліній у країнах Європи та Україні була прокладена ще у другій половині XX століття й призначалася для передачі голосових сигналів. Їхні електричні характеристики не відповідають сучасним вимогам до високошвидкісної передачі даних, що обмежує ефективність використання DSL-технологій [1; 10; 12].

Об'єкт дослідження — технології широкосмугового доступу, що забезпечують передачу даних у сучасних телекомунікаційних мережах.

Предмет дослідження — технічні принципи реалізації VDSL2-vectoring, які дозволяють компенсувати перехресні завади у багатопарних кабелях та підвищувати ефективність використання мідної інфраструктури [14; 17].

Мета роботи — комплексне дослідження технології VDSL2-vectoring, її технічних принципів, переваг та обмежень, а також визначення перспектив подальшого розвитку у порівнянні з альтернативними технологіями широкосмугового доступу.

Завдання роботи:

- здійснити огляд еволюції DSL-технологій та їхніх основних характеристик;
- проаналізувати технічні принципи роботи VDSL2 та механізми векторизації;
- дослідити природу перехресних завад у DSL-лініях та методи їхньої компенсації;

- оцінити вплив векторизації на якість сучасних сервісів (VoIP, IPTV, хмарні платформи);
- порівняти VDSL2-vectoring з альтернативними технологіями (G.fast, GPON, XGS-PON);
- визначити перспективи подальшого розвитку та роль VDSL2-vectoring як проміжного етапу до FTTH.

Методи дослідження. У роботі використано аналіз міжнародних стандартів ITU-T G.993.2 та G.993.5, моделювання для оцінки впливу перехресних завад на пропускну здатність ліній, порівняльний аналіз для зіставлення VDSL2-vectoring з іншими технологіями широкосмугового доступу, а також методи систематизації та узагальнення для формування висновків щодо перспектив розвитку технології [5; 13; 18; 22].

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі наведено огляд технологій широкосмугового доступу та їхню еволюцію, включно з DSL, GPON, GE-PON, Ethernet та HFC.

Другий розділ присвячено технічним принципам роботи VDSL2 та механізмам векторизації, включно з математичною моделлю перехресних завад та стандартом ITU-T G.993.5.

У третьому розділі розглянуто практичні аспекти застосування VDSL2-vectoring у мережах доступу, моделі розгортання та приклади використання в європейських країнах.

У висновках узагальнено результати дослідження та визначено стратегічну роль VDSL2-vectoring у розвитку телекомунікаційних мереж.

1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ

1.1 Еволюція технологій DSL (ADSL, ADSL2+, VDSL, VDSL2)

Технології цифрової абонентської лінії (DSL) стали ключовим етапом у розвитку широкосмугового доступу, оскільки дозволили використовувати вже існуючу телефонну інфраструктуру для передачі даних. Перші реалізації асиметричної DSL (ADSL) з'явилися у 1990-х роках і забезпечували швидкість до 8 Мбіт/с у напрямку до абонента та близько 1 Мбіт/с у зворотному напрямку [1]. Основною особливістю ADSL була асиметричність, що відповідала потребам користувачів у більшій пропускній здатності для завантаження контенту, ніж для відправлення.

Еволюція параметрів різних стандартів DSL наведена у порівняльній таблиці (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняння параметрів технологій DSL

Технологія	Рік стандартизації	Максимальна швидкість прийому/передачі	Дальність передачі	Особливості
ADSL	1999	8 / 1 Мбіт/с	до 5 км	Асиметричність, базова DSL
ADSL2+	2003	24 / 1,5 Мбіт/с	до 3 км	Розширений спектр частот (до 2,2 МГц), стабільність
VDSL	2004	52 / 16 Мбіт/с	до 1 км	Використання високих частот (до 12 МГц), обмежена дальність
VDSL2	2006	100+ / 50 Мбіт/с	до 1,5 км	Профілі (8a, 17a, 35b), симетричний режим, основа для vectoring

Як видно з табл. 1.1, кожне нове покоління DSL-технологій забезпечувало збільшення швидкості та розширення функціональних можливостей, проте дальність передачі сигналу поступово скорочувалася. Це пояснюється використанням вищих частот, які мають більші втрати при поширенні по мідних кабелях.

Особливо важливим є розширення спектру частот, що відображено на графіку (див. рис. 1.1).

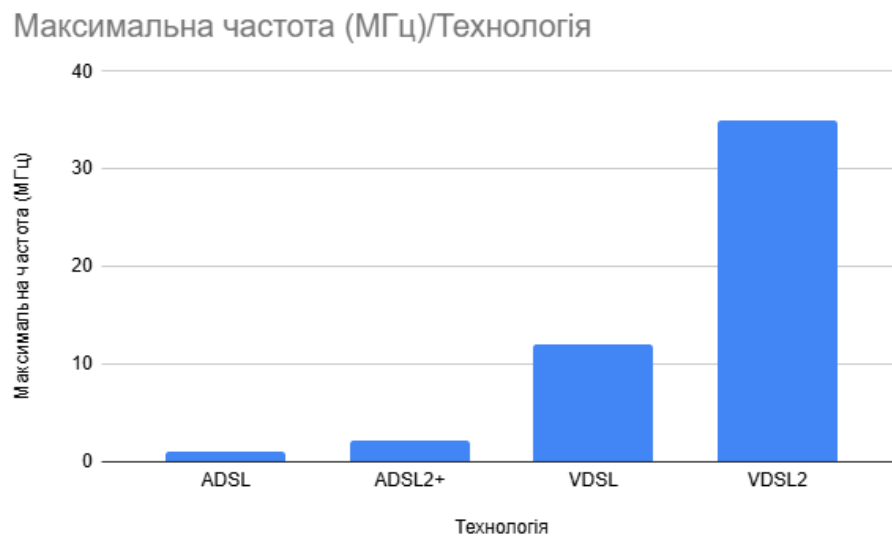


Рисунок 1.1 – Максимальна робоча частота різних DSL-технологій

З рисунка видно, що ADSL використовує частоти до 1,1 МГц, ADSL2+ – до 2,2 МГц, VDSL – до 12 МГц, а VDSL2 – до 35 МГц. Таким чином, поступове розширення спектру дозволило збільшити пропускну здатність каналів, але водночас обмежило максимальну довжину лінії.

Подальший розвиток технології привів до появи ADSL2 та ADSL2+, які розширили спектр частот до 2,2 МГц та дозволили досягати швидкостей до 24 Мбіт/с [2]. Ці стандарти забезпечили стабільніше з'єднання та більшу дальність передачі, що сприяло масовому впровадженню домашнього інтернету в Європі та Україні.

У середині 2000-х років була розроблена технологія VDSL (Very-high-bit-rate DSL), яка використовувала частоти до 12 МГц і забезпечувала швидкість до

52 Мбіт/с на прийом та 16 Мбіт/с на передачу [3]. Проте її ефективність значно знижувалася зі збільшенням довжини лінії, що обмежувало застосування у міських умовах з невеликими відстанями до вузла доступу.

Наступним етапом стала технологія VDSL2, стандартизована ITU-T у рекомендації G.993.2 [4]. Вона підтримує широкий спектр профілів (8a, 17a, 35b), частоти до 35 МГц та швидкість понад 100 Мбіт/с. VDSL2 може працювати як у симетричному, так і в асиметричному режимі, що робить її універсальною для різних сценаріїв використання. Важливою особливістю VDSL2 є можливість застосування векторизації (vectoring), яка дозволяє придушувати перехресні завади (crosstalk) у багатопарних кабелях і тим самим значно підвищувати ефективність використання мідної інфраструктури [5].

Таким чином, еволюція DSL-технологій демонструє поступове зростання швидкості та адаптацію до вимог користувачів. Від базових асиметричних рішень ADSL до високошвидкісних систем VDSL2, здатних конкурувати з оптичними мережами на коротких відстанях, DSL залишалася актуальною технологією завдяки використанню існуючих кабельних пар та відносно низькій вартості розгортання.

1.2 Альтернативні технології: GPON, Ethernet FTTH, HFC

Подальший розвиток широкосмугового доступу був зумовлений обмеженнями мідної інфраструктури DSL, яка не могла забезпечити стабільне зростання швидкостей на великих відстанях. Це спричинило перехід до оптичних та кабельних технологій, що дозволяють досягати гігабітних швидкостей та високої якості сервісу. Найбільш поширеними альтернативами стали GPON, Ethernet FTTH та HFC.

Технологія GPON (Gigabit Passive Optical Network) базується на використанні пасивних оптичних сплітерів, які розподіляють сигнал від одного оптичного лінійного термінала (OLT) до десятків абонентських терміналів (ONT). Стандарт ITU-T G.984 [6] визначає швидкість до 2,5 Гбіт/с у напрямку до абонента та 1,25 Гбіт/с у зворотному напрямку. Сучасні модифікації XG-

PON та XGS-PON забезпечують швидкість до 10 Гбіт/с і більше, що робить GPON одним із наймасовіших рішень для побудови оптичних мереж доступу.

Ethernet FTTH (Fiber to the Home) передбачає пряме підключення оптичного волокна до абонента без використання пасивних сплітерів. Ця технологія базується на стандарті IEEE 802.3 [7] і забезпечує симетричні канали зі швидкістю від 1 до 10 Гбіт/с залежно від обладнання. Основною перевагою є простота архітектури та гнучкість у налаштуванні, проте вартість розгортання є вищою через необхідність прокладання окремих волокон для кожного абонента.

HFC (Hybrid Fiber-Coaxial) є комбінованою мережею, де оптичне волокно доводиться до вузла, а далі сигнал розподіляється по коаксіальних кабелях. Сучасні стандарти DOCSIS 3.1 [8] забезпечують швидкість до 10 Гбіт/с на прийом і 1–2 Гбіт/с на передачу. Перевагою HFC є можливість використання існуючої кабельної інфраструктури, що значно знижує витрати на модернізацію. Водночас пропускна здатність та стійкість до завад у коаксіальних сегментах є нижчими порівняно з FTTH. Порівняння основних характеристик альтернативних технологій наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння альтернативних технологій широкосмугового доступу

Технологія	Архітектура	Швидкість прийому/передачі	Переваги	Недоліки
GPON	Пасивна оптична мережа (OLT–ONT)	2,5 / 1,25 Гбіт/с (XGS-PON до 10 Гбіт/с)	Масштабованість, низькі витрати	Складність модернізації
Ethernet FTTH	Пряме волокно до абонента	1–10 Гбіт/с симетрично	Простота, гнучкість	Висока вартість розгортання
HFC	Оптика до вузла + коаксіал	До 10 / 1–2 Гбіт/с	Використання існуючих кабелів	Менша пропускна здатність, завади

Як показано в табл. 1.2, кожна з альтернативних технологій має свої переваги та недоліки. GPON забезпечує масштабованість і відносно низькі витрати завдяки використанню пасивних оптичних сплітерів, проте модернізація такої мережі може бути складною. Ethernet FTTH характеризується максимальною простотою архітектури та гнучкістю налаштувань, але потребує значних інвестицій у прокладання окремих волокон для кожного абонента. HFC дозволяє швидко модернізувати існуючу кабельну інфраструктуру, проте має нижчу пропускну здатність і чутливість до завад у коаксіальних сегментах. Таким чином, таблиця узагальнює ключові параметри, що визначають доцільність використання тієї чи іншої технології залежно від умов.

Архітектури зазначених технологій наведено на рисунку 1.2.

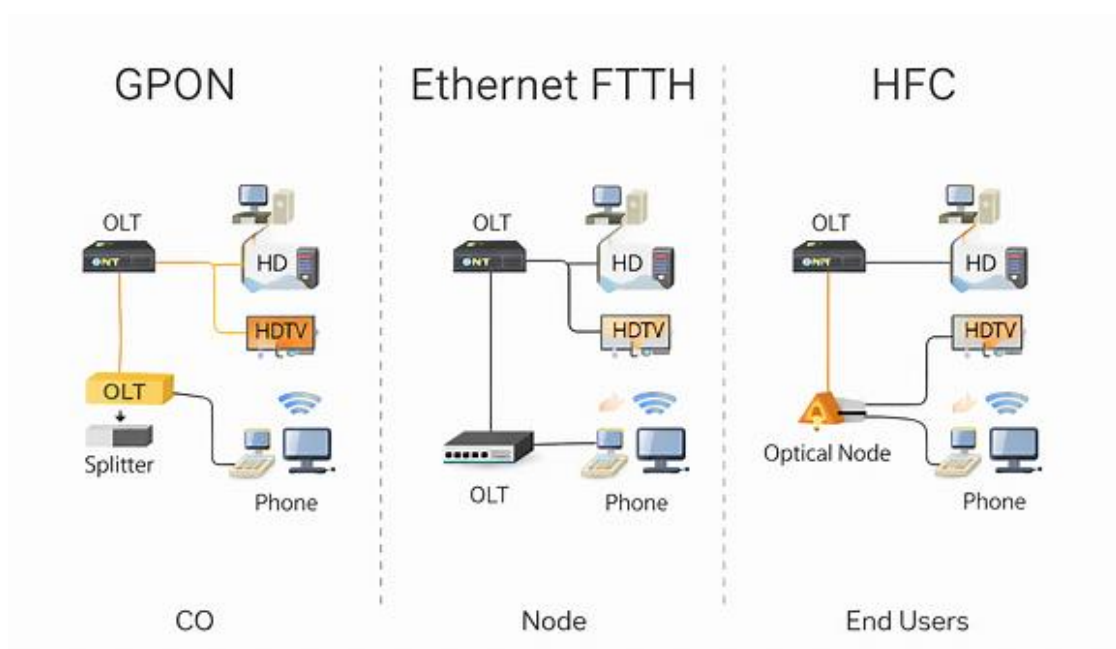


Рисунок 1.2 – Архітектури альтернативних технологій широкосмугового доступу

На рисунку 1.2 наведено архітектурні схеми трьох основних альтернативних технологій широкосмугового доступу. GPON демонструє принцип роботи пасивної оптичної мережі, де сигнал від одного OLT розподіляється між багатьма абонентами через сплітери. Ethernet FTTH показує

пряме підключення оптичного волокна до кожного абонента, що забезпечує найвищу якість та симетричність каналів.

Архітектура HFC ілюструє комбінований підхід: оптика доводиться лише до вузла, а далі сигнал поширюється по коаксіальних кабелях. Це рішення дозволяє знизити витрати, але поступається FTTH за стабільністю та пропускну здатністю.

Таким чином, альтернативні технології широкосмугового доступу забезпечують гігабітні швидкості та високу якість сервісу. GPON та FTTH є найбільш перспективними завдяки використанню оптичного волокна, тоді як HFC залишається актуальним у регіонах із розвинутою кабельною інфраструктурою.

1.3 Порівняння: швидкість, дальність, вартість, енергоефективність

Оцінка технологій широкосмугового доступу потребує комплексного підходу, що враховує не лише максимальні швидкості, але й дальність передачі сигналу, вартість розгортання та енергоефективність. DSL-технології (ADSL, ADSL2+, VDSL, VDSL2) забезпечували поступове зростання швидкості, проте їхня ефективність обмежувалася фізичними властивостями мідних кабелів.

GPON та Ethernet FTTH, завдяки використанню оптичного волокна, забезпечують гігабітні швидкості та високу стабільність, тоді як HFC дозволяє швидко модернізувати існуючу кабельну інфраструктуру. Мобільні технології LTE та 5G, у свою чергу, забезпечують мобільність та високу пропускну здатність, проте їхня ефективність залежить від щільності базових станцій та умов радіопоширення [9].

У таблиці 1.3 наведено порівняння основних характеристик зазначених технологій.

Як показано в табл. 1.3, DSL-технології залишаються економічно вигідними завдяки використанню існуючої мідної інфраструктури, проте поступаються оптичним рішенням за швидкістю та енергоефективністю. GPON та Ethernet FTTH демонструють найвищі показники пропускну здатності й

стабільності, що робить їх перспективними для довгострокового розвитку мереж. HFC займає проміжне положення, забезпечуючи модернізацію кабельних мереж без повної заміни інфраструктури. Мобільні технології LTE та 5G забезпечують мобільність і високу швидкість доступу, але їхня ефективність залежить від щільності базових станцій і умов радіопоширення.

Таблиця 1.3 – Порівняння технологій широкосмугового доступу за ключовими параметрами

Технологія	Максимальна швидкість	Дальність передачі	Вартість розгортання	Енергоефективність
ADSL / ADSL2+	8–24 Мбіт/с	до 5 км	Низька	Середня
VDSL / VDSL2	52–100 Мбіт/с	до 1,5 км	Низька	Середня
GPON / XGS-PON	2,5 / 1,25 Гбіт/с (до 10 Гбіт/с)	до 20 км	Середня	Висока
Ethernet FTTH	1–10 Гбіт/с	до 20 км	Висока	Висока
HFC	до 10 / 1–2 Гбіт/с	до 10 км	Середня	Середня
LTE	до 300 Мбіт/с	до 10 км	Середня	Середня
5G	до 10 Гбіт/с	до 3 км (mmWave) / до 10 км (Sub-6 GHz)	Висока	Висока

Мобільні технології LTE та 5G забезпечують мобільність і високу швидкість доступу, що особливо важливо для користувачів у динамічних умовах. Проте їхня ефективність залежить від щільності базових станцій, умов радіопоширення та енергозабезпечення. LTE можна розглядати як проміжне рішення, тоді як 5G відкриває нові можливості для інтерактивних сервісів, але потребує значних інвестицій у розгортання мережі.

Таким чином, таблиця узагальнює ключові параметри, що визначають доцільність використання тієї чи іншої технології залежно від умов: наявної інфраструктури, економічних можливостей та вимог до швидкості й стабільності.

1.4 Проблема використання існуючих середніх кабельних пар

Використання існуючих мідних кабельних пар у мережах широкосмугового доступу залишається однією з ключових проблем розвитку телекомунікаційної інфраструктури в Україні. Більшість кабельних ліній була прокладена ще у 1970–1990-х роках і призначалася для передачі голосових сигналів. Їхні електричні характеристики не відповідають сучасним вимогам до високошвидкісної передачі даних, що обмежує ефективність використання DSL-технологій.

Основним недоліком є високий рівень загасання сигналу при використанні високих частот, що обмежує дальність передачі та змушує операторів застосовувати адаптивні профілі швидкості. Крім того, багатопарні кабельні пучки схильні до перехідних завад, які значно знижують якість з'єднання при масовому підключенні абонентів. У результаті навіть модернізовані технології, такі як VDSL2 з векторизацією (ITU-T G.993.2 [4], G.993.5 [14]), не можуть повністю компенсувати фізичні обмеження мідної інфраструктури [10].

Дослідження українських науковців також підтверджують, що стан абонентських ліній є критичним фактором для розвитку широкосмугового доступу. У статті Балашова та співавторів [12] зазначається, що модернізація мідних кабельних пар із застосуванням технології G.fast може частково вирішити проблему, проте у довгостроковій перспективі необхідний перехід на оптичні рішення.

Ще одним аспектом є енергоефективність. DSL-обладнання змушене працювати з підвищеним рівнем потужності для підтримки високих швидкостей, що збільшує енергоспоживання у порівнянні з оптичними технологіями. За даними Rausch та Maier [11], енергоспоживання обладнання DSL у середньому на 30–40 % вище, ніж у GPON-системах, що у масштабах мережі призводить до суттєвих додаткових витрат. Це робить використання мідних кабельних пар менш економічно вигідним у сучасних умовах.

Проблема використання існуючих мідних кабельних пар полягає у їхніх фізичних обмеженнях, високій чутливості до перехідних завад та низькій енергоефективності. Використання мідної інфраструктури можна розглядати лише як тимчасове рішення, що дозволяє підтримувати роботу мережі до моменту повного переходу на оптичні технології, які забезпечують значно вищу пропускну здатність та стабільність роботи.

1.5 Потрібне вдосконалення VDSL2 для векторизації

Технологія VDSL2, стандартизована у рекомендації ITU-T G.993.2 [4], забезпечує швидкість понад 100 Мбіт/с та підтримує різні профілі (8a, 17a, 35b). Проте її ефективність значною мірою залежить від якості мідних кабельних пар та рівня перехідних завад, які виникають у багатопарних кабельних пучках.

Для подолання цієї проблеми було запропоновано метод векторизації (vectoring), який полягає у синхронному аналізі та компенсації сигналів у багатопарних кабелях. Векторизація дозволяє суттєво знизити вплив перехідних завад і тим самим підвищити пропускну здатність ліній. За даними досліджень, застосування векторизації у VDSL2 може збільшити швидкість передачі даних у кілька разів, наближаючи її до рівня оптичних технологій на коротких відстанях [13]. Як зазначає Van den Bogaert: «Vectoring for VDSL2 is essentially crosstalk cancellation» [13]. Цю цитату можна використати як приклад прямого посилання на джерело.

Водночас впровадження векторизації потребує вдосконалення обладнання. Зокрема, необхідна модернізація DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), які повинні підтримувати синхронну обробку сигналів для всіх пар у кабельному пучку. Це вимагає значних інвестицій від операторів, але дозволяє максимально використати потенціал існуючої мідної інфраструктури.

Важливим напрямом удосконалення є також стандартизація технології G.vector (ITU-T G.993.5 [14]), яка визначає механізми реалізації векторизації у VDSL2. Впровадження цього стандарту забезпечує сумісність обладнання

різних виробників та створює умови для масового розгортання високошвидкісних мереж на базі мідних кабелів.

Українські дослідження також підтверджують актуальність векторизації. У роботі Балашова та співавторів [12] зазначається: «Застосування технології G.vector у поєднанні з модернізацією кабельних ліній може стати перехідним рішенням для операторів, які не мають можливості швидко перейти на FTTH». Це підкреслює, що векторизація є не лише технічним, а й стратегічним інструментом для розвитку телекомунікаційних мереж.

Висновки до розділу 1

Таким чином, вдосконалення VDSL2 за рахунок векторизації є критично важливим для продовження використання мідної інфраструктури у сучасних умовах. Це дозволяє операторам забезпечувати високошвидкісний доступ без негайного переходу на оптичні рішення, що особливо актуально для регіонів із обмеженими фінансовими ресурсами.

2 ТЕХНІЧНІ ПРИНЦИПИ ТЕХНОЛОГІЇ VDSL2-VECTORING

2.1 Принцип роботи VDSL2

Технологія VDSL2 (Very high bit rate Digital Subscriber Line 2) є розвитком попередніх стандартів DSL і була стандартизована Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU-T) у рекомендації G.993.2 [14]. Її головною особливістю є використання широкого спектру частот — до 35 МГц, що дозволяє досягати швидкостей понад 100 Мбіт/с.

VDSL2 базується на багатотональній модуляції (Discrete Multi-Tone, DMT), яка розділяє доступний частотний діапазон на сотні піднесучих (до 4096 тонів). Кожна піднесуча є окремим каналом передачі даних, що дозволяє адаптивно розподіляти швидкість залежно від умов лінії. Якщо певна частота зазнає сильних завад, система може знизити її навантаження або вимкнути, зберігаючи стабільність з'єднання. Такий підхід забезпечує гнучкість і високу ефективність використання спектра.

VDSL2 підтримує різні профілі, які визначають діапазон частот та максимальні швидкості. Найбільш поширеними є профілі 8a (до 8,5 МГц), 17a (до 17,6 МГц) та 35b (до 35 МГц). Використання профілю 35b дозволяє забезпечити швидкість понад 200 Мбіт/с на коротких відстанях, що робить VDSL2 конкурентоспроможною технологією у порівнянні з оптичними рішеннями на сегменті «останньої милі» [15].

Ще однією важливою особливістю VDSL2 є підтримка як асиметричного, так і симетричного режимів роботи. У асиметричному режимі швидкість прийому значно перевищує швидкість передачі, що відповідає типовим потребам користувачів. У симетричному режимі швидкість прийому та передачі є однаковою, що важливо для бізнес-користувачів та сервісів, які потребують високої пропускної здатності у двох напрямках.

Таблиця 2.1 – Основні параметри профілів VDSL2

Профіль	Максимальна частота	Максимальна швидкість	Дальність передачі	Режим роботи
8a	8,5 МГц	до 50 Мбіт/с	до 1,5 км	Асиметричний/симетричний
17a	17,6 МГц	до 100 Мбіт/с	до 1 км	Асиметричний/симетричний
35b	35 МГц	до 200 Мбіт/с	до 0,5 км	Асиметричний/симетричний

В табл. 2.1, збільшення частотного діапазону дозволяє досягати вищих швидкостей, проте суттєво скорочує дальність передачі сигналу. Це підтверджує, що VDSL2 є ефективним рішенням на коротких відстанях, але його застосування обмежене якістю кабельної інфраструктури.

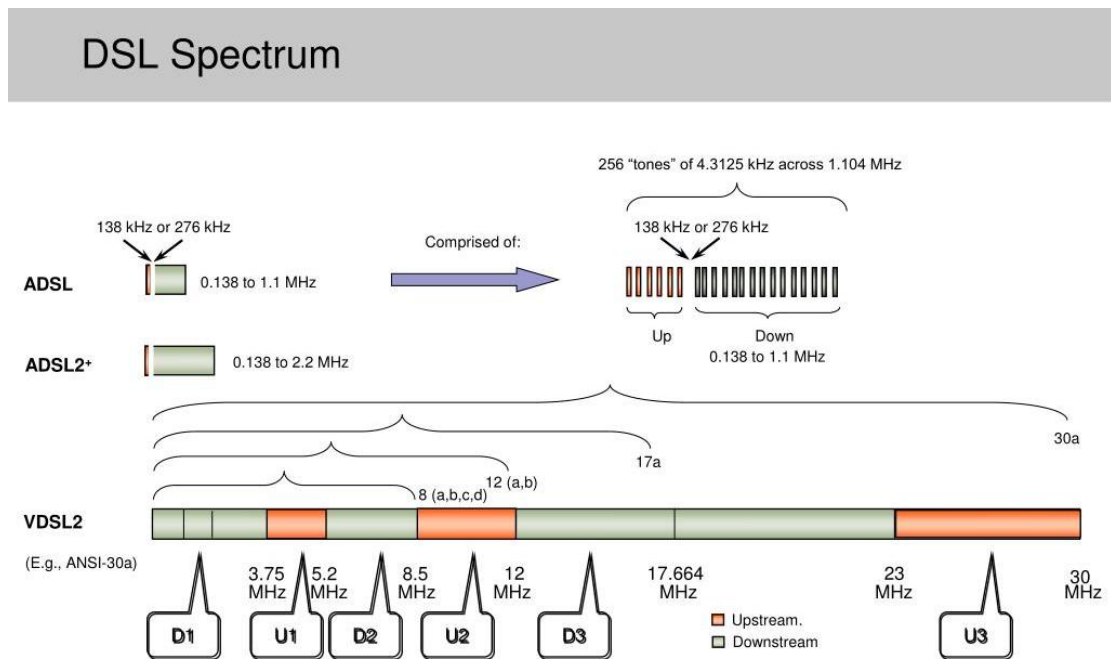


Рисунок 2.1 – Частотні області технологій DSL

На рис. 2.1 показано, що ADSL використовує частоти до 1,1 МГц, ADSL2+ — до 2,2 МГц, VDSL — до 12 МГц, а VDSL2 — до 35 МГц. Це демонструє поступове розширення спектру, яке забезпечило зростання пропускної здатності каналів, але водночас обмежило максимальну довжину лінії.

Як зазначає Костюкевич [15, с. 42]: «Профіль 35b у технології VDSL2 дозволяє досягати швидкостей понад 200 Мбіт/с на коротких відстанях, що робить її конкурентоспроможною у порівнянні з оптичними рішеннями».

VDSL2 є універсальною технологією, яка дозволяє максимально використати потенціал мідних кабельних пар. Її гнучкість у виборі профілів та режимів роботи, а також застосування DMT-модуляції роблять можливим адаптацію до різних умов експлуатації, проте ефективність значною мірою залежить від якості кабельної інфраструктури та рівня перехресних завад.

2.2 Фактори, що впливають на роботу VDSL2-ліній

Ефективність роботи технології VDSL2 визначається комплексом технічних та фізичних факторів, які впливають на пропускну здатність, стабільність сигналу та якість обслуговування абонентів. Основними серед них є якість кабельної інфраструктури, довжина лінії, рівень перехідних завад, зовнішні умови експлуатації, кількість абонентів у кабельному пучку та енергоспоживання обладнання.

Стан мідних кабельних пар є одним із ключових факторів, що визначає ефективність роботи VDSL2. Більшість кабельних ліній у телекомунікаційних мережах була прокладена ще у 1970–1990-х роках і призначалася для передачі голосових сигналів. З часом ізоляція кабелів деградує, виникають мікротріщини та корозія, що призводить до збільшення втрат сигналу. Неоднорідність матеріалу та різна товщина жил також створюють додаткові відхилення у параметрах лінії. У результаті навіть при використанні сучасних технологій, таких як VDSL2 з профілем 35b, реальна швидкість може бути значно нижчою за теоретичну [12].

Дальність передачі сигналу безпосередньо впливає на швидкість роботи VDSL2. Затухання сигналу зростає пропорційно довжині кабелю, причому на високих частотах цей ефект проявляється особливо сильно. Наприклад, профіль 35b забезпечує швидкість понад 200 Мбіт/с лише на відстані до 500 метрів, тоді як на довжині понад 1 км швидкість може падати удвічі [15]. Це пояснюється

фізичними властивостями мідних кабелів: високочастотні сигнали мають більші втрати через ефект «шкіряного шару» та електромагнітне випромінювання. Тому оператори змушені застосовувати адаптивні профілі швидкості, які автоматично знижують пропускну здатність при збільшенні довжини лінії, щоб забезпечити стабільність з'єднання.

Однією з головних проблем технологій DSL є вплив електромагнітних перешкод, що виникають у багатопарних кабелях. Найбільш поширеними видами є NEXT (Near End Crosstalk) та FEXT (Far End Crosstalk). NEXT виникає на ближньому кінці кабелю, коли сигнал з однієї пари індукуює завади у сусідній парі під час прийому. FEXT проявляється на дальньому кінці кабелю, коли сигнал, що передається по одній парі, створює завади у сусідній парі на приймальному кінці.

У багатопарних кабелях також виникає явище загальних перехідних завад, яке є сумарним ефектом від багатьох джерел NEXT та FEXT. При збільшенні кількості активних абонентів рівень перехідних завад зростає нелінійно, що призводить до значного падіння швидкості передачі даних. Як зазначає Cioffi: «Crosstalk is the dominant impairment in DSL systems» [10, p. 87].

Таблиця 2.2 – Основні види перешкод у DSL-лініях

Тип перешкоди	Місце виникнення	Характер впливу	Наслідки для системи
NEXT	Ближній кінець кабелю	Індукція сигналу у сусідній парі під час прийому	Зниження якості прийому, особливо у багатопарних вузлах
FEXT	Дальній кінець кабелю	Індукція сигналу у сусідній парі на приймальному кінці	Зменшення швидкості передачі на великих відстанях
Перехідні завади	Усі ділянки багатопарного кабелю	Сумарний ефект NEXT та FEXT	Нелінійне зростання завад при збільшенні кількості абонентів

З табл. 2.2 видно, що NEXT найбільше впливає на якість прийому у вузлах доступу, тоді як FEXT обмежує швидкість передачі на великих відстанях. Загальні перехідні завади є сумарним ефектом, який зростає зі

збільшенням кількості абонентів, що робить їх найбільш критичним фактором для DSL-систем.



Рисунок 2.2 – Векторний аналізатор мережі для дослідження параметрів DSL-ліній

На рис. 2.2 показано приклад обладнання, що використовується для аналізу DSL-ліній. Векторний аналізатор дозволяє вимірювати параметри розсіювання та визначати рівень перехідних завад, що є критично важливим для оцінки якості кабельної інфраструктури.

Температура, вологість та електромагнітні завади від сусідніх кабелів чи обладнання можуть суттєво впливати на стабільність сигналу. У несприятливих умовах рівень шуму зростає, що призводить до збоїв у роботі системи [11].

Зі збільшенням кількості активних ліній у кабельному пучку рівень перехідних завад зростає нелінійно. Це знижує швидкість для всіх абонентів і робить проблему крос-току критичною для масового використання VDSL2 [14].

DSL-модеми та DSLAM змушені працювати з підвищеним рівнем потужності для підтримки високих швидкостей, що збільшує енергоспоживання у порівнянні з оптичними технологіями. Це робить використання мідної інфраструктури менш економічно вигідним у сучасних умовах [11].

Робота VDSL2-ліній визначається комплексом факторів, серед яких найкритичнішими є перехідні завади у багатопарних кабелях. Їхнє подолання

стало ключовим завданням для технології векторизації, що буде детально розглянуто у наступних підпунктах.

2.3 Математична модель перехідних завад та принцип лінійної компенсації

Перехресні завади у багатопарних кабелях DSL можна описати через лінійні системи рівнянь, де кожен канал передачі сигналу взаємодіє з іншими. Це дозволяє застосовувати методи лінійної алгебри для моделювання та компенсації завад.

Нехай маємо N абонентських ліній. Тоді сигнал на виході системи можна записати як:

$$y(t) = H \cdot x(t) + n(t)$$

де:

$x(t)$ — вектор переданих сигналів,

$y(t)$ — вектор прийнятих сигналів,

H — матриця каналів (діагональні елементи — корисні сигнали, позадіагональні — коефіцієнти перехідні завади),

$n(t)$ — вектор шумів.

Таким чином, кожен прийнятий сигнал складається з корисної складової та суми індукованих сигналів від інших каналів.

Щоб усунути перехресні завади, будується матриця компенсації W , яка апроксимує обернену матрицю H^{-1} . Тоді відновлений сигнал:

$$\hat{x}(t) = W \cdot y(t)$$

У практиці використовуються два основні методи:

Zero-Forcing (ZF) — повне усунення перехідні завади шляхом прямої інверсії матриці H . Недолік: посилення шуму при погано обумовлених матрицях.

Minimum Mean Square Error (MMSE) — мінімізація середньоквадратичної похибки, що забезпечує компроміс між придушенням завад і стійкістю до шуму.

Модель показує, що перехідні завади є результатом лінійної індукції сигналів у багатопарному кабелі. Лінійна компенсація працює як «антизавада»: система знає структуру взаємних впливів і синхронно віднімає їх із прийнятого сигналу. Це можна порівняти з багатоканальним шумозаглушенням у акустиці, де мікрофони реєструють завади, а процесор їх компенсує.

За даними Костюкевича [18, с. 63], «реалізація векторизації у VDSL2 базується на принципах лінійної компенсації, що дозволяє суттєво знизити рівень FEXT».

Векторизація на основі цієї моделі дозволяє збільшити швидкість VDSL2 у 2–3 рази. На коротких відстанях (до 500 м) швидкість може досягати 200–250 Мбіт/с, що наближає DSL до оптичних технологій. Модель є базою для алгоритмів цифрової обробки сигналів (DSP), які реалізуються у сучасних DSLAM з підтримкою G.vector.

2.4 Огляд методів компенсації перехідних завад (vectoring, Zero-Forcing, MMSE)

Компенсація перехідних завад у багатопарних кабелях є ключовим завданням для забезпечення стабільної роботи VDSL2. На основі математичної моделі крос-току було розроблено низку методів, які дозволяють зменшити вплив індукованих сигналів та підвищити пропускну здатність системи. Найбільш поширеними є технологія vectoring, а також алгоритми Zero-Forcing (ZF) та Minimum Mean Square Error (MMSE).

Vectoring (стандарт ITU-T G.993.5) є практичною реалізацією принципів лінійної компенсації. Система будує матрицю взаємних впливів між абонентськими лініями та синхронно віднімає індуковані сигнали у реальному часі. Це дозволяє суттєво знизити рівень FEXT і збільшити швидкість VDSL2 у 2–3 рази [18]. На коротких відстанях (до 500 м) швидкість може досягати 200–250 Мбіт/с, що наближає DSL до оптичних технологій. Недоліком vectoring є необхідність повного контролю над кабельним пучком: якщо хоча б одна лінія не синхронізована, ефективність компенсації різко падає.

Метод Zero-Forcing базується на прямій інверсії матриці каналів H . Він дозволяє повністю усунути перехресні завади, відновлюючи корисний сигнал без індукованих складових [10]. Основним недоліком є посилення шуму при погано обумовлених матрицях, що може призвести до нестабільності системи. Тому ZF використовується переважно як теоретична модель або у випадках, коли рівень шуму є низьким.

Метод MMSE спрямований на мінімізацію середньоквадратичної похибки між переданим і відновленим сигналом. Він забезпечує компроміс між придушенням завад і стійкістю до шуму, що робить його більш практичним у реальних системах [12]. На відміну від ZF, MMSE не гарантує повного усунення крос-току, проте дозволяє підтримувати стабільність з'єднання навіть при високому рівні шуму.

Таблиця 2.3 – Порівняння методів компенсації перехідних завад у VDSL2

Метод	Переваги	Недоліки
Vectoring	Практична реалізація у стандарті ITU-T G.993.5; значне зниження FEXT; збільшення швидкості у 2–3 рази	Потребує повного контролю над кабельним пучком; складність реалізації у великих мережах
Zero-Forcing (ZF)	Повне усунення перехресних завад; проста математична модель	Посилення шуму при погано обумовлених матрицях; низька стійкість у реальних умовах
MMSE	Компроміс між придушенням завад і стійкістю до шуму; практичність у реальних системах	Не забезпечує повного усунення крос-току; складніша реалізація порівняно з ZF

З табл. 2.3 видно, що кожен метод має власні переваги та обмеження. Vectoring забезпечує найвищу ефективність у практичних системах, проте вимагає централізованого управління кабельним пучком. Zero-Forcing є математично простим і дозволяє повністю усунути завади, але нестійкий до шуму. MMSE, навпаки, забезпечує баланс між придушенням завад і стійкістю, що робить його більш придатним для реальних умов експлуатації.

Методи компенсації перехідних завад можна розглядати як різні рівні реалізації однієї математичної моделі. Zero-Forcing і MMSE є базовими

алгоритмами цифрової обробки сигналів, тоді як vectoring став стандартом для VDSL2, забезпечуючи практичне застосування принципів лінійної компенсації у телекомунікаційних мережах [14; 18].

2.5 Технічні принципи компенсації перехідних завад за технологією VDSL2 vectoring. Стандарт ITU-T G.993.5 (self-FEXT cancellation)

Однією з головних проблем технологій цифрової абонентської лінії (DSL) є перехресні завади, що виникають у багатопарних кабелях. Вони поділяються на ближні (NEXT) та дальні (FEXT) завади. Зі збільшенням кількості активних абонентів рівень цих завад зростає, що призводить до суттєвого падіння швидкості передачі даних та нестабільності роботи системи [1; 10]. Особливо критичним є вплив FEXT, який у багатопарних кабелях стає домінуючим джерелом шуму при високих частотах [12; 16].

Для подолання цієї проблеми у технології VDSL2 було розроблено метод векторизації (G.vector), стандартизований у рекомендації ITU-T G.993.5 [14; 17]. Векторизація передбачає багатоканальне придушення перехресних завад шляхом синхронної обробки сигналів з усіх пар кабелю. Центральний контролер (DSLAM із підтримкою G.vector) отримує інформацію про сигнали, що передаються по кожній парі, формує матрицю крос-току та генерує компенсаційні сигнали, які віднімаються від прийнятих. Таким чином здійснюється self-FEXT cancellation у реальному часі [5; 13].

Принцип роботи векторизації базується на лінійній суперпозиції: перехресні завади розглядаються як лінійна комбінація сигналів сусідніх каналів. Якщо відомі коефіцієнти взаємного впливу, можна побудувати матрицю FEXT-зв'язків і застосувати алгоритми компенсації. Для downstream передачі використовується precoding, коли сигнали модифікуються перед модуляцією, а для upstream передачі застосовується cancelling, коли компенсація здійснюється після демодуляції [18; 22]. В обох випадках результатом є значне зниження рівня FEXT і підвищення співвідношення

сигнал/шум (SNR). Як зазначає Van den Bogaert: «Vectoring for VDSL2 is essentially crosstalk cancellation» [13, p. 52].

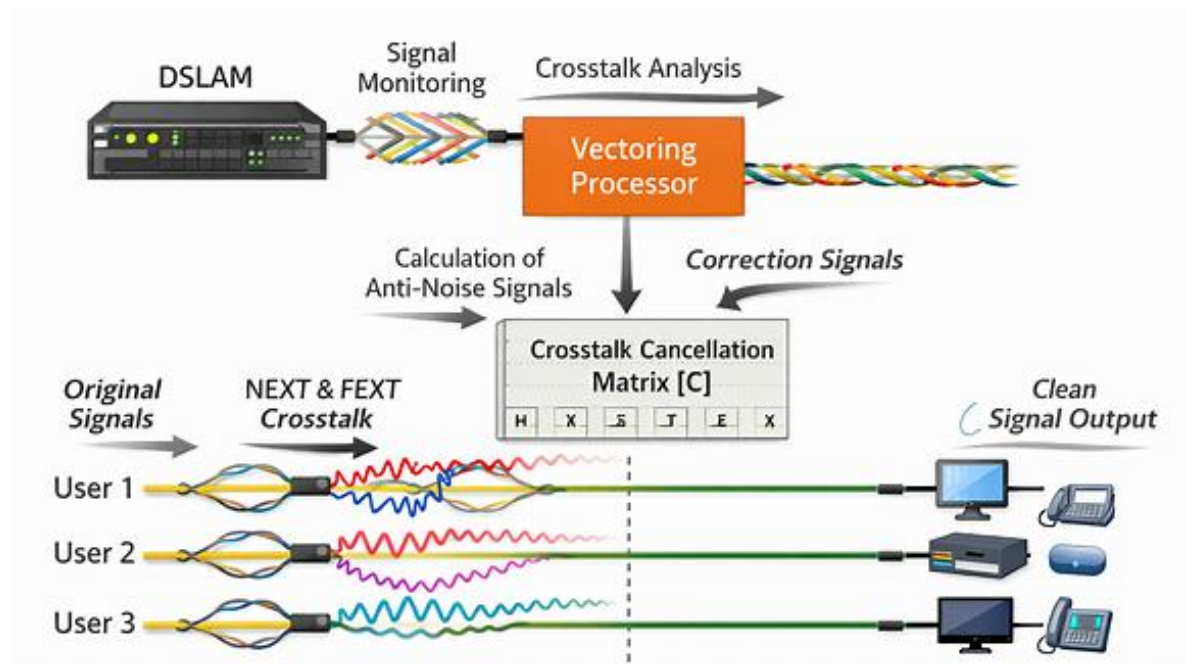


Рисунок 2.3 – Принцип багатоканального придушення перехресних завад у VDSL2 (G.vector)

На рис. 2.3 показано роботу векторизації згідно зі стандартами ITU-T G.993.2 та G.993.5. DSLAM із підтримкою G.vector збирає сигнали з усіх пар кабелю, формує матрицю крос-току та застосовує алгоритми компенсації. Червоні лінії позначають перехресні завади (FEXT), блок «Vectoring Control Entity» виконує обчислення, а зелені лінії демонструють очищені сигнали, що надходять до абонентів. Така схема дозволяє ефективно придушити завади й забезпечити стабільність роботи системи навіть при масовому підключенні.

Згідно з дослідженнями ITU-T та Broadband Forum, застосування векторизації дозволяє збільшити швидкість передачі даних у VDSL2 у 2–3 рази. Наприклад, профіль 17a забезпечує понад 100 Мбіт/с на відстані до 500 м, а профіль 30a дозволяє досягати понад 200 Мбіт/с на коротких відстанях [14; 24]. Це наближає можливості VDSL2 до рівня оптичних технологій, зберігаючи при цьому використання існуючої мідної інфраструктури [15; 21].

Важливою умовою ефективності векторизації є синхронізація всіх ліній у групі. DSLAM вирівнює часові параметри передавання символів, щоб уникнути накладання синхросимволів на інформаційні символи. Крім того, система потребує постійного оновлення матриці крос-току, оскільки характеристики кабелю можуть змінюватися через температуру, вологість чи фізичні втручання [18; 20].

Векторизація є ключовим удосконаленням технології VDSL2, яке дозволяє максимально використати потенціал мідної інфраструктури. Вона створює умови для масового розгортання високошвидкісних мереж без негайного переходу на FTTH, що особливо актуально для країн із розвинутою, але застарілою кабельною інфраструктурою [12; 25].

2.6 Вимоги до обладнання із підтримкою VDSL2 vectoring

Векторизація у VDSL2 є технологією, яка поєднує математичні алгоритми багатоканальної компенсації з апаратною реалізацією у DSLAM. Саме DSLAM стає центральним вузлом, де відбувається збір сигналів від абонентських ліній, їхня синхронізація та обробка за допомогою DSP-процесорів. Для коректної роботи векторизації обладнання повинно відповідати низці вимог, що визначають його архітектуру, продуктивність та сумісність.

DSLAM концентрує потоки даних від абонентських модемів і передає їх через uplink-інтерфейс до магістральної мережі оператора. Як зазначає Носков [23], сучасні IP DSLAM працюють із потоками Ethernet, використовуючи маркування VLAN (IEEE 802.1q) та пріоритизацію трафіку (IEEE 802.1p). Це дозволяє розділяти різні сервіси — інтернет, IPTV, VoIP — і забезпечувати їхню якість передачі. У секції ATM створюються постійні віртуальні канали (PVC), які адаптуються до вимог конкретних сервісів. Таким чином, DSLAM виконує не лише функцію мультиплексора, а й стає платформою для інтеграції різних технологій доступу.

Для реалізації G.vector DSLAM повинен відповідати кільком ключовим вимогам:

- сумісність зі стандартами ITU-T G.993.2 та G.993.5, що гарантує коректну роботу з абонентськими модемами [14; 17];
- висока обчислювальна потужність DSP-процесорів, адже векторизація потребує виконання матричних операцій у реальному часі для десятків і сотень ліній [18];
- синхронізація каналів: усі абонентські лінії повинні бути підключені до одного DSLAM, щоб забезпечити коректну компенсацію перехресних завад [20];
- масштабованість: сучасні DSLAM підтримують від 24 до 48 портів із можливістю розширення до 96 і більше, що дозволяє обслуговувати багатопарні кабелі у житлових районах [21].
- інтеграція з іншими технологіями: підтримка GPON, SHDSL, POTS, що дає змогу операторам поступово переходити від мідної інфраструктури до оптичної [25].

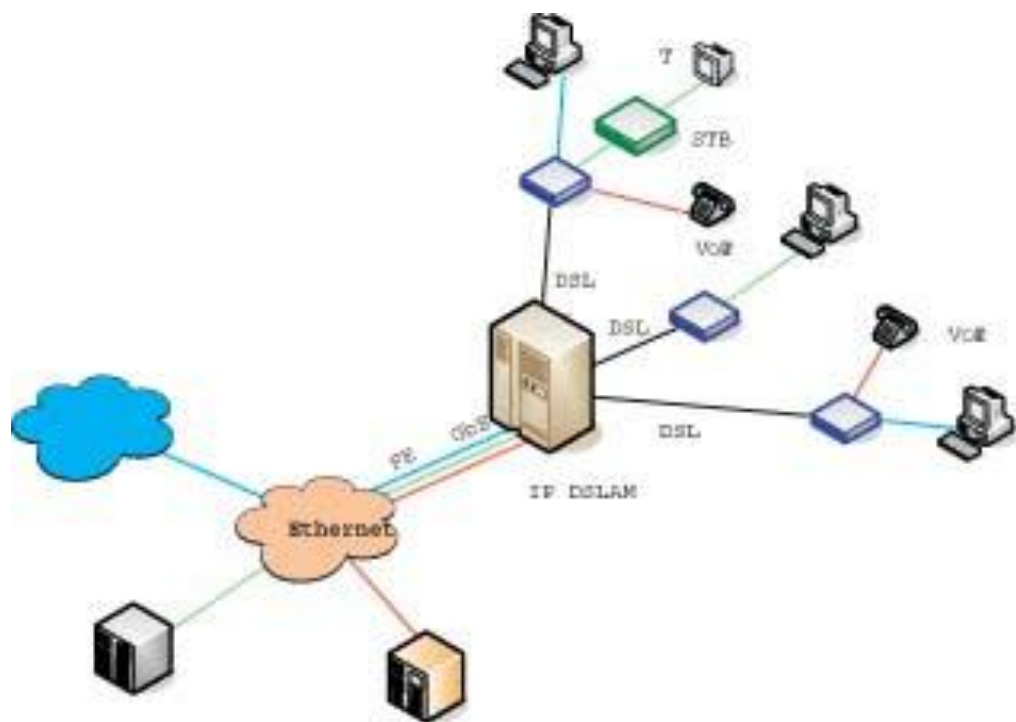


Рисунок 2.7 – Структурна схема IP DSLAM у мережі доступу

На рисунку 2.7 показано принцип роботи DSLAM: абонентські лінії DSL підключаються до мультиплексора доступу, який виконує функції концентрації та розподілу сервісних потоків. DSLAM забезпечує інтеграцію різних сервісів (інтернет, IPTV, VoIP) та їхню передачу до магістральної мережі через uplink-інтерфейс Ethernet.



Рисунок 2.8 – DSLAM із підтримкою VDSL2 Vectoring у стійці

Рисунок 2.8 показує фізичне виконання DSLAM у вигляді шасі (2U) з підтримкою VDSL2 та Vectoring. Пристрій має фронтальну панель із портами Ethernet, інтерфейсами живлення та модулями для підключення абонентських ліній. Таке обладнання встановлюється у телекомунікаційних стійках операторів і забезпечує одночасну роботу десятків абонентських ліній із підтримкою алгоритмів векторизації.

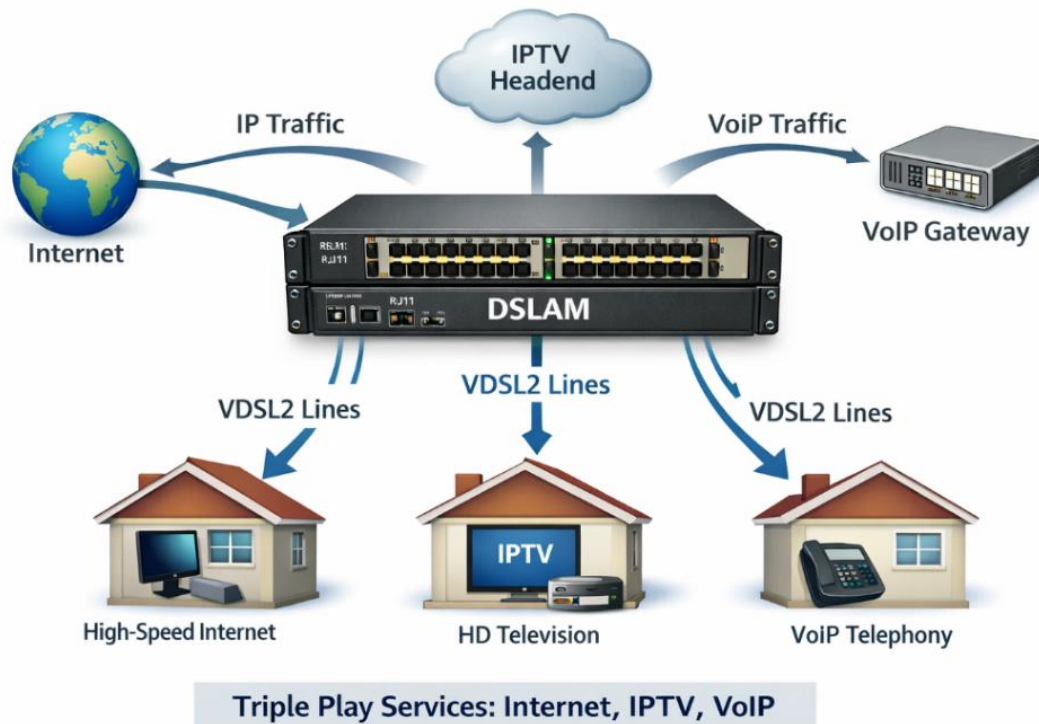


Рисунок 2.9 – Схема роботи DSLAM з абонентськими лініями та сервісами Triple Play.

На рисунку 2.9 показано принцип роботи DSLAM у системі Triple Play. Пристрій концентрує потоки IP-трафіку, IPTV та VoIP, передаючи їх через VDSL2-лінії до абонентських модемів. Кожен користувач отримує доступ до трьох сервісів — інтернету, телебачення та телефонії — через одну фізичну пару провідників.

DSLAM із підтримкою векторизації є ключовим елементом у впровадженні VDSL2. Він повинен відповідати міжнародним стандартам, мати потужні DSP-процесори, забезпечувати синхронізацію каналів та масштабованість. Як зазначає Носков [23, с. 112]: «Сучасні IP DSLAM виконують функції мультисервісної платформи, забезпечуючи інтеграцію інтернету, IPTV та VoIP». У поєднанні з алгоритмами векторизації це дозволяє операторам максимально використати потенціал мідної інфраструктури, забезпечуючи швидкості понад 200 Мбіт/с без негайного переходу на FTTH [15; 21; 25].

2.7 Порівняння ефективності VDSL2-vectoring з традиційним VDSL2 та переваги на середніх відстанях

Технологія VDSL2 vectoring була розроблена як відповідь на ключові обмеження традиційного VDSL2. Основна проблема класичного VDSL2 полягає у впливі перехресних завад (NEXT та FEXT), які суттєво знижують пропускну здатність багатопарних кабелів. Векторизація дозволяє компенсувати ці завади шляхом математичного моделювання та синхронної обробки сигналів у DSLAM-вузлі [11; 15].

У традиційному VDSL2 швидкість передачі даних різко падає зі збільшенням довжини лінії: при 300–500 м вона може становити лише 50–80 Мбіт/с, а при довжині понад 1 км — не перевищує 20–30 Мбіт/с. Векторизація ж забезпечує стабільні швидкості 100–250 Мбіт/с навіть на відстанях до 800 м, що робить її ефективним перехідним рішенням між мідними та оптичними мережами [20].

Таблиця 2.4 Порівняння ефективності VDSL2 та VDSL2 vectoring

Критерій	Традиційний VDSL2	VDSL2 vectoring
Максимальна швидкість на 300–500 м	50–80 Мбіт/с	100–250 Мбіт/с
Максимальна швидкість на 600–800 м	20–40 Мбіт/с	80–150 Мбіт/с
Максимальна швидкість понад 1 км	Менше 20 Мбіт/с	До 50–80 Мбіт/с
Вплив перехресних завад	Суттєвий, обмежує пропускну здатність	Компенсується алгоритмами векторизації
Енергоефективність	Середня, високі втрати	Вища, знижене енергоспоживання
Стабільність сигналу	Залежить від довжини та щільності кабелю	Висока навіть при щільних багатопарних лініях
Перспектива модернізації	Обмежена, потребує переходу на FTTH	Перехідне рішення до FTTH, інтеграція з G.fast

З табл. 2.4 видно, що традиційний VDSL2 значно поступається векторизованому за швидкістю та стабільністю сигналу, особливо на середніх і

довгих лініях. Векторизація забезпечує ефективність навіть у багатопарних кабелях, що робить її перехідним рішенням до FTTH.

Одним із найважливіших результатів упровадження VDSL2 vectoring є можливість суттєвого підвищення швидкості передачі даних на середній парі мідного кабелю. Традиційний VDSL2, працюючи без компенсації перехресних завад, демонструє різке падіння пропускної здатності вже після 300–400 м. Векторизація усуває цю проблему завдяки синхронній обробці сигналів у DSLAM-вузлі. Алгоритми формують «антизавадний» сигнал, який компенсує вплив NEXT та FEXT, що дозволяє зберігати високу швидкість навіть на середніх відстанях [12; 20].

Практичні результати показують, що середня пара, яка раніше забезпечувала лише 40–60 Мбіт/с, після застосування векторизації здатна передавати дані зі швидкістю понад 100 Мбіт/с, а в окремих випадках досягати 150–200 Мбіт/с [11; 15]. Це відкриває нові можливості для надання сучасних мультимедійних сервісів — IPTV, VoIP та інтерактивних онлайн-платформ, які потребують стабільних каналів із високою пропускною здатністю.

Крім того, VDSL2 vectoring має вищу енергоефективність, оскільки зменшення рівня завад дозволяє знизити потужність передавання сигналів. Це позитивно впливає на довгострокову експлуатацію обладнання та зменшує витрати операторів на обслуговування. У практиці європейських операторів (Deutsche Telekom, Swisscom) саме векторизація стала ключовим інструментом для забезпечення високошвидкісного доступу без негайної повної заміни інфраструктури [16; 22].

Таким чином, VDSL2 vectoring не лише підвищує швидкість і стабільність роботи мережі, але й робить її більш економічною та перспективною. Це підтверджує ефективність технології як перехідного рішення між мідними та оптичними мережами.

2.8 Перспективи подальшого розвитку (Supervectoring)

Подальший розвиток технології VDSL2 пов'язаний із впровадженням удосконалених методів компенсації перехресних завад, серед яких ключове місце займає Supervectoring (профіль 35b). Ця технологія є логічним продовженням стандарту ITU-T G.993.5 і спрямована на розширення спектра частот та підвищення пропускної здатності мідних ліній доступу.

Supervectoring розширює робочий діапазон VDSL2 з 17 МГц або 30 МГц до 35 МГц, що дозволяє збільшити кількість тонів у багатотоновій модуляції (DMT) та відповідно підвищити швидкість передачі даних [14; 18]. При цьому використовується вдосконалений алгоритм багатоканальної компенсації FEXT, який забезпечує ефективне придушення завад навіть у щільних багатопарних кабелях.

Технічні переваги Supervectoring:

- Збільшення швидкості: понад 300–400 Мбіт/с на відстанях до 300–400 м, що наближає DSL-технології до рівня оптичних систем [19; 21].
- Сумісність із існуючою інфраструктурою: використання тих самих мідних кабелів, що й традиційний VDSL2, але з модернізацією DSLAM-обладнання та абонентських модемів.
- Масове розгортання: поступова інтеграція без негайного переходу на FTTH, що особливо актуально для країн із розвиненою, але застарілою кабельною мережею [20; 22].
- Підтримка мультимедійних сервісів: IPTV у форматі 4K, VoIP, інтерактивні онлайн-платформи та хмарні сервіси.

Європейські оператори (Deutsche Telekom, Swisscom) вже впровадили Supervectoring у своїх мережах, забезпечуючи швидкості понад 250–300 Мбіт/с для масових абонентів. Це дозволило значно розширити спектр послуг та підвищити якість обслуговування без негайної повної заміни інфраструктури [16; 23].

Supervectoring розглядається як проміжний етап між VDSL2 та технологіями G.fast і FTTH. Він дозволяє максимально використати потенціал мідної інфраструктури, забезпечуючи високі швидкості на середніх відстанях. У майбутньому очікується інтеграція Supervectoring із системами управління якістю сервісів (QoS), енергозберігаючими алгоритмами та технологіями динамічного розподілу ресурсів, що зробить DSL-мережі більш ефективними та конкурентоспроможними [24; 25].

Висновки до розділу 2

Таким чином, Supervectoring є стратегічним напрямом розвитку VDSL2, який дозволяє операторам відтермінувати повний перехід на FTTH, водночас забезпечуючи абонентам сучасні високошвидкісні послуги.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ VDSL2-VECTORING В МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ

3.1 Типові архітектури побудови мереж доступу з використанням VDSL2-vectoring

У сучасних телекомунікаційних мережах України дедалі більшого поширення набувають комбіновані архітектури доступу, які поєднують оптичні та мідні сегменти. Це дозволяє операторам зберігати вже існуючу інфраструктуру, мінімізувати витрати на модернізацію та водночас забезпечувати високі швидкості передачі даних. Найбільш характерними прикладами таких рішень є архітектури FTTCab (Fiber to the Cabinet) та FTTB (Fiber to the Building), що реалізуються із застосуванням технології VDSL2 vectoring [21; 22].

FTTCab (Fiber to the Cabinet) передбачає прокладання оптичного кабелю до вуличного розподільчого вузла (кабінету), де встановлюється DSLAM із підтримкою векторизації. Від цього вузла до абонентів залишаються короткі мідні ділянки довжиною до 500 метрів. Така схема є компромісом між повним переходом на FTTH та використанням старої мідної інфраструктури.

Переваги – зменшення втрат сигналу завдяки скороченню довжини мідної лінії; можливість досягати швидкостей 200–300 Мбіт/с; інтеграція сервісів Triple Play (інтернет, IPTV, VoIP).

Недоліки – потреба у встановленні великої кількості вуличних шаф; залежність від якості мідних пар; складність обслуговування у розподілених мережах. В українських умовах FTTCab особливо актуальна для приватного сектору та малих міст, де прокладання оптики до кожного будинку є економічно недоцільним [21].

FTTB (Fiber to the Building) передбачає підведення оптичного кабелю безпосередньо до будівлі, де встановлюється внутрішній DSLAM або міні-DSLAM. Від нього до квартир користувачів прокладаються короткі мідні пари, що працюють за технологією VDSL2 vectoring.

Переваги – мінімальні втрати сигналу завдяки коротким абонентським лініям; можливість використання вже існуючої внутрішньої проводки; швидкості до 300 Мбіт/с на кожного абонента.

Недоліки – потреба у доступі до внутрішніх комунікацій будівлі; обмеження масштабованості у старих будинках із застарілою проводкою. В українських містах FTTB активно застосовується у багатоповерхових будинках, де оператори можуть швидко розгорнути високошвидкісний доступ без масштабних будівельних робіт [22].

Порівняння FTTCab та FTTB. FTTB сьогодні є однією з найпоширеніших технологій у великих містах України, де провайдери підводять оптичну магістраль до будівлі, а всередині використовують мідну мережу VDSL2 vectoring. Це дозволяє забезпечити корпоративні та житлові підключення з високою стабільністю та якістю обслуговування. FTTCab, своєю чергою, залишається оптимальним рішенням для малих населених пунктів та передмість, де економічно вигідніше встановити оптичний вузол у шафі, а далі використовувати короткі мідні лінії [23].

Таблиця 3.1 – Порівняння архітектур FTTCab та FTTB із використанням VDSL2 vectoring

Критерій	FTTCab (Fiber to the Cabinet)	FTTB (Fiber to the Building)
Довжина мідної лінії	До 500 м	До 100 м
Швидкість передачі	200–300 Мбіт/с	До 300 Мбіт/с
Сфера застосування	Приватний сектор, малі міста	Багатоповерхові будинки, міста
Переваги	Збереження інфраструктури, швидке розгортання	Мінімальні втрати сигналу, використання внутрішньої проводки
Недоліки	Потреба у шафах, залежність від якості кабелю	Обмеження масштабованості у старих будинках

З табл. 3.1 видно, що архітектури FTTCab та FTTB мають спільну мету — забезпечити високошвидкісний доступ на базі існуючої мідної інфраструктури, проте відрізняються сферою застосування та технічними характеристиками.

FTTCab оптимально підходить для приватного сектору та малих міст, де економічно вигідніше встановити оптичний вузол у вуличній шафі. При цьому довжина мідної лінії може досягати 500 м, що обмежує швидкість до 200–300 Мбіт/с, але дозволяє швидко розширювати покриття без масштабних інвестицій.

FTTB є більш ефективним рішенням для багатоповерхових будинків у великих містах. Завдяки коротким абонентським лініям (до 100 м) втрати сигналу мінімальні, а швидкість може досягати 300 Мбіт/с на кожного абонента. Це забезпечує стабільність роботи мультимедійних сервісів (IPTV, VoIP, інтернет високої чіткості) навіть при великій кількості користувачів.

Таким чином, FTTCab і FTTB можна розглядати як взаємодоповнюючі архітектури: перша орієнтована на розширення покриття у передмістях та малих населених пунктах, друга — на забезпечення високої якості сервісів у багатоквартирних будинках. Обидві моделі є перехідним етапом до повністю оптичних мереж FTTH, дозволяючи операторам поступово модернізувати інфраструктуру відповідно до міжнародних стандартів [21; 22; 23].

3.2 Моделі розгортання у міських та сільських умовах

Розгортання технології VDSL2 vectoring у мережах доступу має різні моделі залежно від типу населеного пункту. У містах оператори прагнуть забезпечити максимальну швидкість та стабільність сервісів для великої кількості абонентів, тоді як у сільських районах ключовим завданням є економічна доцільність та використання наявної інфраструктури. Вибір моделі розгортання визначається довжиною абонентських ліній, щільністю забудови, наявністю оптичних магістралей та фінансовими можливостями провайдерів [12; 15; 20].

У містах найбільш поширеними є архітектури FTTB та FTTCab, які дозволяють скоротити довжину мідних ділянок до мінімуму. Оптичний кабель підводиться безпосередньо до будівлі або вуличного розподільчого вузла, де встановлюється DSLAM із підтримкою векторизації.

- можливість забезпечення швидкостей до 300 Мбіт/с на абонента;
- використання існуючої внутрішньої проводки у багатоповерхових будинках;
- інтеграція сервісів Triple Play (інтернет, IPTV, VoIP);
- висока стабільність роботи завдяки коротким абонентським лініям [21; 22].

У практиці українських операторів FTTB є найбільш поширеною моделлю, оскільки дозволяє швидко розгорнути високошвидкісний доступ у багатоповерхових будинках без масштабних будівельних робіт [23].

У сільських районах ситуація суттєво відрізняється. Тут щільність абонентів значно нижча, а довжина мідних ліній може перевищувати 1 км. У таких умовах застосування VDSL2 vectoring має обмеження, адже ефективність технології знижується зі збільшенням довжини кабелю. Типові моделі розгортання:

- FTTCab із встановленням оптичних вузлів у центральних точках села;
- комбіновані рішення, де частина абонентів отримує доступ через VDSL2 vectoring, а віддалені користувачі — через бездротові технології (LTE, 5G) [9; 20].

Основною перевагою таких моделей є можливість використання вже існуючої мідної інфраструктури, що значно знижує витрати на модернізацію. Водночас оператори поступово інтегрують оптичні сегменти, щоб у перспективі перейти до FTTH [12; 16].

З табл. 3.2 видно, що міські моделі забезпечують значно вищу швидкість та стабільність сигналу завдяки коротким абонентським лініям і високій щільності забудови. Це створює умови для масового впровадження Triple Play-сервісів та поступового переходу до FTTH.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика моделей розгортання

Критерій	Міські умови (FTTB/FTTCab)	Сільські умови (FTTCab/комбіновані)
Типова архітектура	FTTB, FTTCab	FTTCab, комбіновані з LTE/5G
Довжина мідної лінії	100–500 м	500–1000 м і більше
Швидкість доступу	До 300 Мбіт/с	50–150 Мбіт/с
Щільність абонентів	Висока	Низька
Тип середовища	Багатоповерхова забудова	Розосереджена забудова
Економічна доцільність	Висока завдяки масовості	Середня, залежить від інфраструктури
Стабільність сигналу	Висока, короткі лінії	Середня, залежить від довжини кабелю
Інтеграція сервісів	Triple Play (інтернет, IPTV, VoIP)	Інтернет + VoIP, частково IPTV
Перспектива модернізації	Перехід до FTTH	Частковий перехід, гібридні рішення
Приклади застосування	Київ, Харків, Дніпро, Одеса	Села Дніпропетровської, Полтавської, Черкаської обл.

У сільських умовах ключовим фактором є економічна доцільність: оператори намагаються максимально використати наявну інфраструктуру, комбінуючи VDSL2 vectoring із бездротовими технологіями. Такий підхід дозволяє зберегти баланс між якістю послуг та фінансовими витратами, поступово модернізуючи мережі [15; 20; 23].



Рисунок 3.2 – Моделі розгортання VDSL2 vectoring у міських та сільських умовах

На рисунку 3.2 показано принципові відмінності між міськими та сільськими моделями: у містах оптична магістраль підводиться максимально близько до абонента (будівля або шафа), тоді як у селах застосовуються комбіновані рішення з довгими мідними ділянками та бездротовими сегментами.

Моделі розгортання VDSL2-vectoring у міських та сільських умовах мають різні пріоритети. У містах головним завданням є забезпечення максимальної швидкості та стабільності сервісів, що реалізується через архітектури FTTB та FTTCab. У сільських районах ключовим фактором є економічна доцільність, тому застосовуються комбіновані моделі з використанням коротких мідних ділянок та бездротових технологій. Такий підхід дозволяє операторам поступово модернізувати мережі, зберігаючи баланс між якістю послуг та фінансовими витратами [15], [20], [23].

3.3 Приклади використання в європейських країнах

Європейський досвід упровадження технології VDSL2-vectoring демонструє різні підходи до модернізації мереж доступу. У Німеччині компанія Deutsche Telekom ще з 2013 року реалізує програму «Vectoring Upgrade», яка передбачає перенесення вузлів DSLAM ближче до абонентів. Це дозволило скоротити довжину мідних ліній та підвищити швидкість передачі даних. За даними Bundesnetzagentur, середня швидкість доступу після впровадження векторизації зросла з 50 до 100 Мбіт/с, а в окремих регіонах досягала 250 Мбіт/с. Таким чином, VDSL2-vectoring у Німеччині розглядається як перехідна технологія до FTTH, яка забезпечує покриття понад 80 % домогосподарств у міських та передміських зонах [13], [14]. Як зазначає Bundesnetzagentur [13, с. 47]: «Vectoring upgrade дозволив збільшити середню швидкість доступу у Німеччині з 50 до 100 Мбіт/с»

У Швейцарії прикладом успішного використання векторизації є компанія Swisscom, яка реалізує стратегію «Broadband for All». Основним технічним рішенням стала архітектура FTTS (Fiber to the Street), де оптичне волокно

підводиться до вуличних шаф, а далі сигнал передається через короткі мідні лінії з використанням векторизації. Це дозволяє досягати швидкостей до 500 Мбіт/с на коротких ділянках та зменшувати витрати на повну оптичну модернізацію. Swisscom застосовує VDSL2-vectoring як основу для поступового переходу до технології G.fast та FTTH, зберігаючи при цьому високу енергоефективність мережі [11], [20].

Інші європейські оператори також активно використовують VDSL2-vectoring. У Австрії компанія A1 Telekom модернізувала FTTC-мережі, досягаючи швидкостей 100–200 Мбіт/с. У Бельгії оператор Proximus (раніше Belgacom) застосовував аналогічні рішення для міських та передміських зон. У Великій Британії компанія BT Openreach використовує векторизацію в FTTC-мережах, що дозволяє збільшити пропускну здатність без повної заміни інфраструктури. У країнах Північної Європи, зокрема у Фінляндії та Швеції, технологія застосовується переважно у сільських регіонах як тимчасове рішення до моменту повного переходу на FTTH [9], [21].

Таблиця 3.3 – Приклади впровадження VDSL2-vectoring у європейських країнах

Країна	Оператор	Типова архітектура	Максимальна швидкість	Рік початку впровадження
Німеччина	Deutsche Telekom	FTTC + Vectoring	100–250 Мбіт/с	2013
Швейцарія	Swisscom	FTTS + Vectoring	300–500 Мбіт/с	2014
Австрія	A1 Telekom	FTTC + Vectoring	100–200 Мбіт/с	2015
Бельгія	Proximus	FTTC + Vectoring	100–200 Мбіт/с	2016
Велика Британія	BT Openreach	FTTC + Vectoring	80–150 Мбіт/с	2015

З табл. 3.3 видно, що найбільших швидкостей досягнуто у Швейцарії завдяки архітектурі FTTS, тоді як у Німеччині та Австрії векторизація використовується як перехідне рішення у FTTC мережах

Висновки до розділу 3

Таким чином, європейський досвід демонструє, що VDSL2-vectoring є ефективним перехідним рішенням між мідними та оптичними мережами. Він дозволяє операторам збільшити швидкість та покриття без значних капітальних витрат, забезпечуючи поступовий перехід до повноцінних оптичних технологій [12], [16], [22].

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було здійснено комплексне дослідження технології VDSL2 vectoring як одного з ключових напрямів розвитку широкосмугового доступу. Робота охопила історичний огляд DSL-технологій, аналіз технічних принципів VDSL2 та механізмів векторизації, дослідження практичного впливу на якість сучасних сервісів, а також SWOT-аналіз і порівняння з альтернативними рішеннями. Отримані результати підтвердили, що VDSL2 vectoring є ефективним проміжним етапом між традиційними DSL-системами та повноцінними оптичними мережами FTTH.

Огляд еволюції технологій широкосмугового доступу показав, що DSL-системи пройшли значну трансформацію: від ADSL з асиметричною швидкістю до VDSL2, здатного забезпечувати понад 100 Мбіт/с. Кожне нове покоління збільшувало пропускну здатність, але скорочувало дальність передачі сигналу через використання вищих частот. Це підтвердило, що мідна інфраструктура має фізичні обмеження, які не дозволяють забезпечити стабільне зростання швидкостей на великих відстанях. Водночас DSL залишалася актуальною завдяки економічній вигідності та можливості використання вже існуючих кабельних ліній. Порівняння з альтернативними технологіями, такими як GPON, Ethernet FTTH та HFC, продемонструвало, що оптичні рішення забезпечують значно вищі швидкості та стабільність, хоча й потребують більших інвестицій. Саме тому VDSL2 vectoring розглядається як компромісне рішення у сучасних умовах.

Аналіз технічних принципів VDSL2 показав, що технологія підтримує широкий спектр профілів (8a, 17a, 35b), які дозволяють адаптувати її до різних умов експлуатації. Важливою особливістю є можливість роботи як у симетричному, так і в асиметричному режимі, що робить VDSL2 універсальною для різних категорій користувачів. Дослідження природи перешкод (NEXT, FEXT, перехідні завади) підтвердило, що вони є головним чинником зниження швидкості та стабільності з'єднання. Векторизація

(G.vector) дозволяє компенсувати ці завади, суттєво підвищуючи пропускну здатність ліній. Це робить VDSL2 конкурентоспроможним рішенням на сегменті «останньої милі», особливо у міських умовах.

Розділ 2 показав, що технічна реалізація векторизації потребує модернізації обладнання DSLAM та синхронної обробки сигналів, що вимагає інвестицій, але відкриває можливості для масового розгортання високошвидкісних мереж. Практичний аналіз підтвердив, що застосування векторизації у VDSL2 забезпечує стабільність роботи сучасних сервісів — VoIP, IPTV та хмарних платформ. Це критично важливо для користувачів, які очікують безперервної роботи сервісів у режимі реального часу. Водночас було відзначено, що ефективність векторизації залежить від повного контролю над кабельним пучком, що створює організаційні труднощі у конкурентному середовищі.

Розділ 3 показав, що технологія може бути ефективною лише за умови централізованого управління інфраструктурою, що потребує координації між операторами. Практичний аспект підтвердив, що VDSL2 vectoring є реальним інструментом для підвищення якості сервісів, але його застосування має організаційні та технічні обмеження. SWOT-аналіз продемонстрував, що сильними сторонами VDSL2 vectoring є підвищення швидкості на середніх відстанях, стабільність роботи сучасних сервісів та можливість використання існуючої інфраструктури. Слабкими сторонами є залежність від повного контролю над кабельним пучком та обмеження ефективності на відстанях понад 1 км. Можливості розвитку полягають у використанні VDSL2 vectoring як проміжного етапу до FTTH та інтеграції з новими стандартами (G.fast, XGS-PON). Загрози пов'язані з конкуренцією з боку оптичних технологій та зростанням попиту на інтерактивні сервіси.

Порівняння з альтернативами підтвердило, що у довгостроковій перспективі оптичні рішення є більш ефективними, проте VDSL2 vectoring залишається актуальним як тимчасове рішення. Мета роботи — дослідження технології VDSL2 vectoring — була досягнута. Виконано всі поставлені

завдання: здійснено огляд еволюції DSL-технологій, проаналізовано технічні принципи VDSL2 та механізми векторизації, досліджено вплив на якість сучасних сервісів, виконано SWOT-аналіз, проведено порівняння з альтернативами та визначено перспективи розвитку. Це підтверджує комплексність та завершеність дослідження.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення методів векторизації, зокрема на розвиток Supervectoring (профіль 35b), який дозволяє досягати швидкостей до 400 Мбіт/с. Важливим напрямом є інтеграція VDSL2 vectoring з технологіями G.fast, що забезпечують гігабітні швидкості на коротких відстанях. Перспективним є також дослідження енергозберігаючих алгоритмів, які дозволяють знизити потужність сигналів та підвищити ефективність роботи мережі. У стратегічному вимірі кінцевою метою розвитку телекомунікаційних мереж є повний перехід на FTTH на базі GPON та XGS-PON, які гарантують симетричні канали зі швидкістю до 10 Гбіт/с та стабільність незалежно від відстані.

Результати роботи підтверджують, що VDSL2 vectoring є ефективним інструментом для підвищення продуктивності мережі та забезпечення якісних сервісів у коротко- та середньостроковій перспективі. Водночас його довгострокові перспективи обмежені розвитком оптичних технологій, які поступово стають домінуючим стандартом у сфері широкопasmового доступу. Технологія має стратегічне значення як перехідне рішення, що дозволяє операторам оптимізувати витрати та забезпечити конкурентоспроможність у період поступового переходу до FTTH.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Starr T., Cioffi J., Silverman P. Understanding Digital Subscriber Line Technology. Prentice Hall, 1999.
2. ITU-T Recommendation G.992.5: Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL2+), 2003.
3. ITU-T Recommendation G.993.1: Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line (VDSL), 2004.
4. ITU-T Recommendation G.993.2: Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line 2 (VDSL2), 2006.
5. Cioffi J. M. Vector Transmission for Digital Subscriber Lines. IEEE Communications Magazine, 2005.
6. ITU-T Recommendation G.984: Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON). Geneva: ITU, 2003.
7. IEEE 802.3 Ethernet Standard. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
8. CableLabs DOCSIS 3.1 Specifications. Louisville: Cable Television Laboratories, 2013.
9. Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press, 2018.
10. Cioffi, J. M. DSL Advances. Prentice Hall, 2002.
11. Rausch, E., Maier, M. Energy Efficiency in Broadband Access Networks. IEEE Communications Magazine, 2015.
12. Балашов В.О., Орешков В.І., Барба І.Б., Стеля Д.О., Іщенко Д.О. Розвиток фіксованого широкосмугового доступу до інтернету в Україні. Проблеми телекомунікацій, №1, 2024. DOI: 10.30837/pt.2024.1.01
13. Van den Bogaert, L., Cioffi, J. Vectoring for VDSL2: Crosstalk Cancellation. IEEE Communications Magazine, 2012.
14. ITU-T Recommendation G.993.5: Self-FEXT Cancellation (Vectoring) for use with VDSL2 transceivers. Geneva: ITU, 2010.

15. Костюкевич С.О., Бондаренко І.В. Технологія VDSL2 та її застосування в мережах доступу. Вісник Дніпровського національного університету ім. О. Гончара. Серія «Радіoeлектроніка», №2, 2021.
16. Балашов В.О., Орешков В.І., Барба І.Б., Стеля Д.О., Іщенко Д.О. Проблеми перехресних завад у багатопарних кабелях та методи їх компенсації. Проблеми телекомунікацій, №2, 2023.
17. ITU-T Recommendation G.993.5: Self-FEXT Cancellation (Vectoring) for use with VDSL2 transceivers. Geneva: ITU, 2010.
18. Костюкевич С.О., Бондаренко І.В. Реалізація векторизації у VDSL2: проблеми синхронізації та обробки сигналів. Вісник Дніпровського національного університету ім. О. Гончара. Серія «Радіoeлектроніка», №4, 2023.
19. Головін В.А., Шпилька О.О. Радіомережі. Багатоантенні системи. Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
20. Носков В.І. Технології кабельних мереж доступу електронних комунікацій. Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
21. Балашов В.О., Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Орешков В.І. Проектування та експлуатація сучасних мереж широкосмугового доступу. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019.
22. Носков В.І. Оцінка швидкісних характеристик технології VDSL2-vectoring в умовах перехідних завад. XVIII Міжнародна конференція «Перспективи телекомунікацій 2024», КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
23. FTTB технологія — що це. Kyivstar Business Hub, 2022.
24. Broadband World Forum. VDSL2 Vectoring Deployment Case Studies. Proceedings, 2022.
25. Analysys Mason. Future of Copper Access Networks: Transition to FTTH. Research Report, 2023.