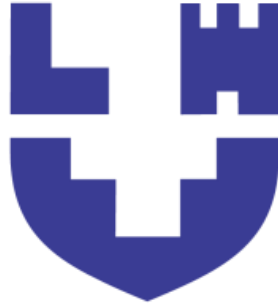


Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет



ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Конспект лекцій
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі»
спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та
радіотехніка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

Рекомендовано до видання вченою радою факультету робототехніки та штучного інтелекту ЛНТУ, протокол № ____ від « ____ » _____ 2026 року.

Голова вченої ради ФРАІ _____ Анатолій ТКАЧУК

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛЩУК

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки, фізики та СМАРТ-систем ЛНТУ, протокол № ____ від « ____ » _____ 2026 року.

Завідувач кафедри ЕФСС	_____	Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки, фізики та СМАРТ-систем ЛНТУ
---------------------------	-------	--

Укладач:	_____	Наталія ЯКИМЧУК к.т.н., доц. кафедри електроніки, фізики та СМАРТ-систем ЛНТУ
----------	-------	--

Рецензент:	_____	Наталія ХРИСТИНЕЦЬ к.т.н., доц. кафедри комп'ютерної інженерії та охоронних систем ЛНТУ
------------	-------	---

Відповідальний за випуск:	_____	Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки, фізики та СМАРТ- систем ЛНТУ
------------------------------	-------	---

I - 74 Інструментальне вимірювання та діагностика в телекомунікаціях.
Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі» спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка / уклад. Н. М. Якимчук. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 117 с.

Видання містить виклад теоретичного матеріалу з дисципліни «Інструментальне вимірювання та діагностика в телекомунікаціях». Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі» спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка.

Н. М. Якимчук, 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Тема 1. Вступ до інструментальних вимірювань у телекомунікаціях.....	5
Тема 2. Інструментальні вимірювання у ВОЛЗ.....	15
Тема 3. Оптична рефлектометрія у часовій області (OTDR).....	25
Тема 4. Інструментальні вимірювання параметрів антенно-фідерних трактів.....	35
Тема 5. Векторні аналізатори мереж (VNA).....	45
Тема 6. Інструментальні вимірювання параметрів радіоканалів та бездротових мереж.....	60
Тема 7. Основи спектрального аналізу та принцип роботи спектроаналізатора.....	70
Тема 8. Корпоративні та промислові мережі. Локальна та операційна діагностика.....	81
Тема 9. Моніторинг і діагностика в експлуатації.....	98
Список джерел.....	110

ВСТУП

Надійна робота сучасних телекомунікаційних мереж потребує достовірної інформації про параметри сигналів, стан обладнання та якість передавання даних. Інструментальні вимірювання забезпечують експериментальну основу для перевірки технічних рішень, виявлення несправностей і контролю експлуатаційних характеристик. Уміння обирати вимірювальні засоби, правильно застосовувати їх та обґрунтовано інтерпретувати результати є необхідною складовою професійної підготовки фахівця з телекомунікацій.

Конспект лекцій призначений для здобувачів вищої освіти спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка за освітньою програмою «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі». Метою видання є формування системного розуміння методів інструментального вимірювання та діагностики, їхніх можливостей, обмежень і застосування на різних рівнях телекомунікаційної системи.

Матеріал послідовно охоплює основи вимірювань, похибки та невизначеність, дослідження волоконно-оптичних ліній зв'язку, оптичну рефлектометрію, контроль антенно-фідерних трактів, застосування векторних аналізаторів мереж, вимірювання параметрів радіоканалів і спектральний аналіз. Окрему увагу приділено діагностиці корпоративних і промислових мереж, моніторингу та оцінюванню технічного стану під час експлуатації.

Виклад поєднує пояснення фізичних принципів роботи приладів із розглядом практичних умов вимірювання. Акцент зроблено на зв'язку між вимірюваним параметром, методикою його визначення та інженерним висновком. Такий підхід допомагає розрізняти прояви й причини несправностей, враховувати вплив вимірювального тракту та оцінювати достовірність отриманих даних.

Опрацювання конспекту створює основу для виконання лабораторних і практичних завдань, самостійного аналізу результатів та прийняття обґрунтованих рішень щодо налаштування, обслуговування й відновлення працездатності телекомунікаційних мереж.

Тема 1. Вступ до інструментальних вимірювань у телекомунікаціях

Місце інструментальних вимірювань у телекомунікаціях. Рівні телекомунікаційної системи та відповідні вимірювання. Класи вимірювальних інструментів у телекомунікаціях. Основні вимірювані величини та параметри. Похибки, невизначеність і достовірність вимірювань. Інструментальні вимірювання в типових телекомунікаційних системах.

1.1 Місце інструментальних вимірювань у телекомунікаціях

Інструментальні вимірювання є фундаментальною складовою телекомунікаційної інженерії, яка забезпечує зв'язок між теоретичними моделями, результатами комп'ютерного моделювання та реальною роботою телекомунікаційних систем. Будь-яка система зв'язку – від простої кабельної лінії до складної багатостандартної мережі – може вважатися працездатною лише тоді, коли її параметри підтверджені вимірюваннями.

У телекомунікаціях вимірювання виконують не допоміжну, а визначальну роль. Вони використовуються на всіх етапах життєвого циклу системи: під час проєктування для перевірки правильності технічних рішень, при введенні в експлуатацію для підтвердження відповідності нормативним вимогам, а також у процесі експлуатації для діагностики, пошуку несправностей і контролю деградації параметрів. Без інструментальних вимірювань неможливо ані оцінити якість каналу зв'язку, ані локалізувати причину відмови, ані гарантувати стабільність роботи мережі в часі.

На відміну від класичних вимірювань у загальній електротехніці, телекомунікаційні вимірювання мають справу не лише з електричними величинами, а й з інформаційними параметрами. Об'єктом вимірювання тут виступає не окремий елемент схеми, а сигнал, канал або система в цілому. Саме тому результат вимірювання в телекомунікаціях завжди пов'язаний із функціонуванням системи передачі інформації та оцінюється з точки зору її здатності передавати дані з заданою якістю.

У загальному вигляді **інструментальні вимірювання в телекомунікаціях** можна визначити як процес експериментального визначення параметрів сигналів, каналів і мереж зв'язку за допомогою спеціалізованих вимірювальних приладів з метою оцінювання їх технічного стану та якості передавання інформації. Ключовою особливістю таких вимірювань є те, що вони виконуються в робочих або близьких до робочих режимах системи.

Будь-яка система вимірювань у телекомунікаціях базується на кількох фундаментальних засадах. По-перше, вимірювання завжди виконуються у визначеній області представлення сигналу – часовій, частотній або фазово-амплітудній. Вибір цієї області не є формальним, оскільки саме він визначає, які властивості сигналу або каналу стають доступними для аналізу. По-друге, результат вимірювання має сенс лише за умови чітко визначеної методики, яка враховує режим роботи об'єкта, параметри підключення приладу та обмеження самого вимірювального засобу. По-третє, кожне вимірювання супроводжується похибками, а тому повинно розглядатися не як абсолютно точне значення, а як оцінка параметра з певною невизначеністю.

З інженерної точки зору телекомунікаційні вимірювання ґрунтуються на принципі **неінвазивності** або мінімального впливу на об'єкт. Вимірювальний прилад не повинен істотно змінювати параметри сигналу чи каналу, інакше результат перестає відображати реальний стан системи. Саме цим пояснюється широке використання узгоджених навантажень, каліброваних вимірювальних трактів і стандартних інтерфейсів підключення.

Структурно будь-яку систему вимірювань у телекомунікаціях можна подати як послідовність взаємопов'язаних елементів. Об'єкт вимірювання – це сигнал, лінія, тракт або мережа, параметри яких необхідно визначити. Вимірювальний інтерфейс забезпечує фізичне підключення приладу до об'єкта та формує умови коректного зняття інформації. Власне вимірювальний прилад виконує перетворення фізичного сигналу у форму, придатну для аналізу, після чого результати проходять етап обробки, візуалізації та інтерпретації. Саме на останньому етапі інженер приймає рішення щодо технічного стану системи або необхідності втручання.

Особливістю телекомунікаційних вимірювань є тісний зв'язок між фізичними параметрами сигналу та інформаційними характеристиками системи. Наприклад, зміна спектральних характеристик безпосередньо впливає на завадостійкість, а нестабільність фазових параметрів призводить до зростання помилок передавання. Тому інструментальні вимірювання в телекомунікаціях слугують не лише засобом контролю, а й інструментом розуміння процесів, що відбуваються в каналі зв'язку.

Таким чином, інструментальні вимірювання є невід'ємною частиною професійної діяльності інженера телекомунікацій. Вони формують практичну основу для аналізу, проєктування та експлуатації систем зв'язку і дозволяють перейти від абстрактних моделей до обґрунтованих технічних рішень. Саме з цього погляду курс «Інструментальні вимірювання в телекомунікаціях» слід розглядати як базовий для формування інженерного мислення бакалавра телекомунікацій.

1.2 Рівні телекомунікаційної системи та відповідні вимірювання

Телекомунікаційна система є багаторівневою структурою, у якій кожен рівень відповідає за власний набір функцій і має характерні параметри, що підлягають вимірюванню (рис. 1.1). Коректна діагностика та оцінювання якості роботи системи можливі лише тоді, коли вимірювання виконуються з урахуванням конкретного рівня, на якому виникає проблема або проводиться аналіз.

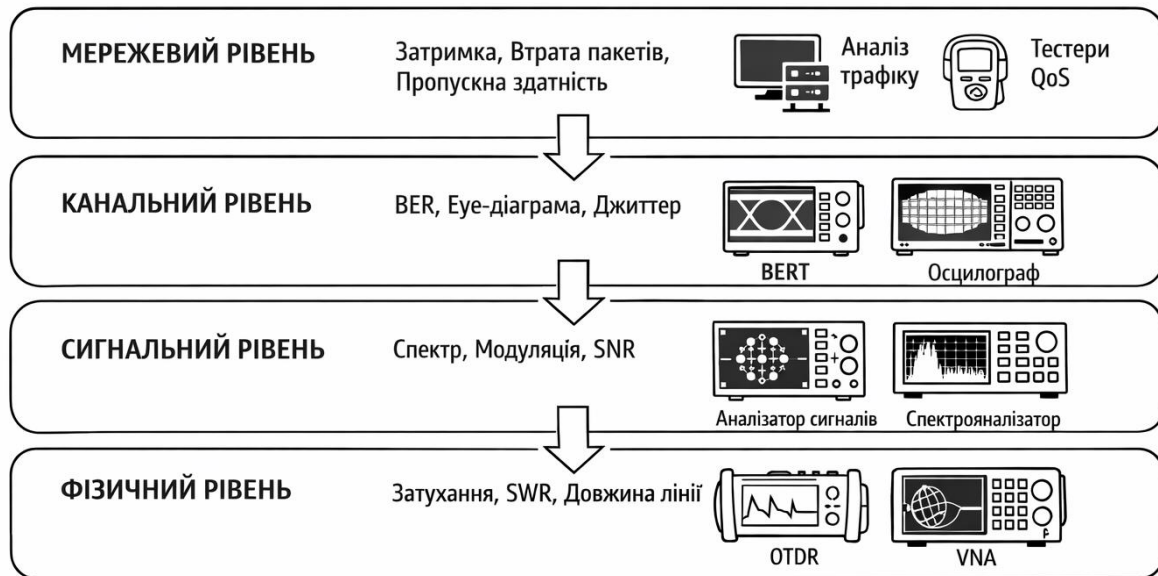


Рисунок 1.1 – Рівні телекомунікаційної системи

Фізичний рівень охоплює матеріальну основу телекомунікацій: лінії передачі, кабелі, оптичні волокна, антенно-фідерні тракти, роз'єми та пасивні елементи. На цьому рівні сигнал розглядається як фізичний процес поширення електромагнітної або оптичної енергії.

Основна мета вимірювань фізичного рівня – оцінити втрати, узгодження та цілісність середовища передавання. Типовими параметрами є затухання, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт стоячої хвилі, довжина лінії, наявність неоднорідностей або пошкоджень.

Для цього застосовуються методи рефлектометрії у часовій області, векторні частотні вимірювання, а також вимірювання рівнів потужності. Характерними інструментами є оптичні та електричні рефлектометри, векторні аналізатори ланцюгів, вимірювачі потужності та спеціалізовані кабельні тестери. Результати таких вимірювань дозволяють зробити висновок про придатність фізичного середовища до передачі сигналів.

Сигнальний рівень пов'язаний з аналізом форми, спектра та параметрів сигналу, який передається каналом. Тут важливо не лише *чи доходить сигнал*, а в *якому вигляді* він доходить до приймача.

На цьому рівні вимірюються частота, спектральна ширина, рівень шуму, співвідношення сигнал/шум, параметри модуляції, стабільність амплітуди та фази. Особливу увагу приділяють спектральним спотворенням і позасмуговим випромінюванням, які можуть створювати завади іншим системам.

Основними методами є спектральний аналіз, аналіз у комплексній площині (IQ-аналіз), вимірювання фазових і частотних характеристик. Для цього використовуються спектроаналізатори, аналізатори сигналів, генератори тестових сигналів та високочастотні осцилографи. Ці інструменти дозволяють оцінити, наскільки сигнал відповідає заданому стандарту або технічним умовам.

Канальний рівень характеризує здатність системи передавати цифрову інформацію з прийнятною якістю. Тут сигнал розглядається вже не як фізичний процес, а як носій бітової інформації.

Ключовими вимірюваними параметрами є ймовірність бітової помилки, форма eye-діаграми, часові спотворення, джиттер, стабільність синхронізації. Саме на цьому рівні безпосередньо оцінюється вплив завад, шуму та нелінійностей на передавання даних.

Використовуються методи тестування з відомими послідовностями, аналіз часових діаграм, статистичне оцінювання помилок. Типові інструменти – генератори та аналізатори псевдовипадкових бітових послідовностей, прилади для вимірювання ймовірності помилки, осцилографи з функцією eye-diagram. Результати таких вимірювань дозволяють зробити висновок про реальну пропускну здатність і надійність каналу.

Мережевий рівень описує роботу телекомунікаційної системи як частини мережі, де важливими є не лише фізичні та сигнальні параметри, а й ефективність передавання трафіку між вузлами.

На цьому рівні вимірюються затримка, джиттер пакетів, втрати пакетів, пропускну здатність, стабільність з'єднань. Параметри мають статистичний характер і залежать від навантаження, топології мережі та налаштувань обладнання.

Застосовуються активні та пасивні методи вимірювання трафіку, аналіз пакетів, імітація навантаження. Інструментами виступають програмно-апаратні аналізатори мережевого трафіку, системи моніторингу, програмні генератори трафіку. Такі вимірювання дозволяють оцінити якість обслуговування та виявити проблеми, які не проявляються на нижчих рівнях.

1.3 Класи вимірювальних інструментів у телекомунікаціях

Телекомунікаційні системи є складними багаторівневими об'єктами, тому для їх дослідження та діагностики застосовується не один універсальний прилад, а набір спеціалізованих вимірювальних інструментів. Кожен клас таких інструментів орієнтований на певний рівень системи та дозволяє оцінювати конкретні параметри сигналів, каналів або мережі. Розуміння призначення кожного класу приладів, їх можливостей і обмежень є необхідною передумовою коректного вибору методики вимірювань і правильного трактування результатів.

Наведена нижче таблиця 1 узагальнює основні класи вимірювальних інструментів, які використовуються в різних сферах телекомунікацій. Найчастіше виділяють 5 основних груп застосувань: волоконно-оптичні лінії зв'язку, радіоканали та бездротові мережі, антенно-фідерні тракти, корпоративні та промислові мережі, моніторинг і діагностика в експлуатації..

Таблиця 1 – Класи вимірювальних інструментів

Клас інструментів	Об'єкт вимірювання	Основні параметри	Методи вимірювання	Рівень системи
Осцилографи	Часова форма сигналу	Амплітуда, фронти, джиттер, eye-діаграма	Часове дискретизування, статистичний аналіз	Сигнальний, каналний
Спектроаналізатори	Частотний вміст сигналу	Частота, спектр, шумовий поріг, позасмугові складові	Sweep-аналіз, FFT	Сигнальний
Аналізатори сигналів (VSA)	Модульований сигнал	EVM, IQ-діаграми, фазові та амплітудні спотворення	IQ-демодуляція, аналіз сузір'я	Сигнальний
Векторні аналізатори кіл (VNA)	Пасивні та активні тракти	S-параметри, SWR, фазові характеристики	Частотне зондування, калібрування	Фізичний
Рефлектометри (OTDR, TDR)	Лінії передачі	Затухання, довжина, дефекти, неоднорідності	Рефлектометрія в часовій області	Фізичний
Вимірювачі потужності	Енергетичні параметри сигналу	Середня та пікова потужність	Пряме детектування	Фізичний

Клас інструментів	Об'єкт вимірювання	Основні параметри	Методи вимірювання	Рівень системи
BER-тестери (BERT)	Цифровий канал	Ймовірність бітової помилки, eye-mask	Передавання тестових послідовностей	Канальний
Аналізатори мережевого трафіку	Пакетна передача	Затримка, втрати, пропускна здатність, джиттер	Пасивний і активний аналіз	Мережевий
Аналізатори синхронізації	Часові та фазові параметри	Phase noise, Time Error, MTIE	Часо-інтервальний аналіз	Синхронізація
Програмно-визначені прилади (SDR)	Сигнали та канали (віртуально)	Комплексні сигнальні параметри	Програмна обробка	Усі рівні

1.4 Основні вимірювані величини та параметри

Інструментальні вимірювання в телекомунікаціях спрямовані на кількісне оцінювання фізичних і інформаційних властивостей сигналів, каналів та систем передавання. Вимірювані величини відображають різні аспекти функціонування системи – від поширення електромагнітної енергії до якості передавання інформації. Для коректного аналізу результатів необхідно використовувати єдину термінологію, чітко розуміти фізичний зміст параметрів, їх одиниці вимірювання та типові діапазони значень.

1) Амплітудно-енергетичні величини.

Однією з базових вимірюваних величин є **потужність сигналу**, яка характеризує швидкість передавання енергії сигналом. У телекомунікаціях потужність зазвичай вимірюється в логарифмічній шкалі:

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{1P}{mBt} \right), \quad (1.1)$$

де (P) – потужність у ватах.

Одиниці вимірювання: дБм, дБВт. Типові значення: – оптичні системи: від –60 до +10 дБм; – радіочастотні системи: від –120 до +30 дБм.

Тісно пов'язаною величиною є **рівень сигналу**, який використовується для порівняльної оцінки амплітуд у різних точках тракту. Рівні виражаються в децибелах і не є абсолютною величиною, а лише відношенням двох потужностей або напруг.

2) Частотні параметри.

Частота сигналу визначає швидкість коливань та є фундаментальною характеристикою будь-якої телекомунікаційної системи. Одиниця вимірювання – герц (Гц).

Типові діапазони:

- дротові системи: кГц–МГц;
- радіозв'язок: МГц–десятки ГГц;
- оптичні системи: сотні ТГц (довжина хвилі в нм).

Для реальних сигналів важливою є **спектральна ширина** або смуга пропускання, яка визначає інтервал частот, у межах якого зосереджена основна енергія сигналу. Саме спектральна ширина визначає вимоги до каналу зв'язку та можливість сумісного використання частотного ресурсу.

3) Параметри ліній та трактів передавання.

Для фізичного рівня ключовими є параметри, що описують поширення сигналу в лінії. **Затухання** характеризує втрати сигналу на шляху поширення та визначається як:

$$A = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вих}}} \right). \quad (1.2)$$

Одиниця вимірювання – децибел (дБ).

Типові значення:

- оптичне волокно: 0,2–0,4 дБ/км;
- коаксіальні кабелі: одиниці–десятки дБ/100 м.

Важливим параметром узгодження є **коефіцієнт відбиття**, який визначається відношенням відбитої хвилі до падаючої. На практиці часто використовується **коефіцієнт стоячої хвилі (SWR)**, що пов'язаний з коефіцієнтом відбиття і характеризує ефективність узгодження навантаження з лінією. Типові допустимі значення SWR для телекомунікаційних трактів не перевищують 1,5–2.

4) Шумові параметри.

Будь-яка телекомунікаційна система працює в умовах шуму. Основною характеристикою є **співвідношення сигнал/шум (SNR)**:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{сигнал}}}{P_{\text{шум}}} \right). \quad (1.3)$$

Одиниця вимірювання – дБ.

Типові значення:

- прийнятні для аналогових систем: понад 30 дБ;

– для цифрових систем – залежать від типу модуляції та швидкості передавання. SNR безпосередньо впливає на імовірність помилок та визначає граничну дальність і пропускну здатність каналу.

5) Параметри якості цифрової передачі.

Для цифрових телекомунікацій ключовим параметром є **ймовірність бітової помилки (BER)**, яка визначається як відношення кількості помилково прийнятих бітів до загальної кількості переданих:

$$BER = \frac{N_{\text{помилки}}}{N_{\text{бітів}}}. \quad (1.5)$$

Це безрозмірна величина.

Типові цільові значення:

- (10^{-3}) – мінімально допустимий рівень;
- (10^{-6}) – (10^{-12}) – для сучасних цифрових систем.

Додатково використовуються **eye-діаграми**, які наочно відображають часові спотворення, джиттер і запас за рівнем приймання, та дозволяють якісно оцінити стан цифрового каналу.

6) Часові параметри.

У мережевих та синхронізаційних вимірюваннях важливими є **затримка**, **джиттер** та **варіація затримки**.

Затримка вимірюється в секундах і визначає час проходження сигналу від передавача до приймача.

Джиттер характеризує короточасні флуктуації затримки та вимірюється в наносекундах або пікосекундах. Для високошвидкісних систем допустимі значення джиттера становлять одиниці–десятки пікосекунд.

1.5 Похибки, невизначеність і достовірність вимірювань

Будь-яке інструментальне вимірювання в телекомунікаціях не може дати абсолютно точного значення параметра. Результат вимірювання завжди є **наближенням до істинного значення**, обмеженим властивостями приладу, умовами експерименту та особливостями об'єкта вимірювання. Тому коректна інтерпретація результатів неможлива без розуміння похибок, невизначеності та критеріїв достовірності вимірювань.

Істинне значення – ідеальне значення фізичної величини, яке існує об'єктивно, але принципово недосяжне для безпосереднього вимірювання.

Результат вимірювання – значення величини, отримане за допомогою вимірювального засобу та методики, яке використовується на практиці.

Похибка вимірювання – різниця між результатом вимірювання та істинним значенням величини. Оскільки істинне значення невідоме, похибка завжди оцінюється опосередковано.

Невизначеність вимірювання – кількісна характеристика розсіювання можливих значень вимірюваної величини, яка відображає ступінь довіри до результату вимірювання. На відміну від похибки, невизначеність не пов'язується з невідомим істинним значенням, а є практично застосовним показником якості вимірювання.

Класифікація похибок вимірювань

Похибки за характером прояву поділяються на **систематичні** та **випадкові**.

Систематичні похибки мають сталий або закономірний характер і призводять до зміщення результатів в один бік. У телекомунікаційних вимірюваннях вони часто зумовлені некоректним калібруванням приладу, нестабільністю опорних генераторів, втратами в з'єднувальних кабелях або впливом температури. Такі похибки можуть бути зменшені або усунені шляхом калібрування, компенсації та правильного вибору методики вимірювання.

Випадкові похибки проявляються у вигляді розсіювання результатів при повторних вимірюваннях і пов'язані з шумами, флуктуаціями сигналів та нестабільністю умов вимірювання. У телекомунікаціях вони особливо характерні для вимірювань шумових параметрів, BER та спектральних характеристик. Випадкові похибки не можуть бути повністю усунені, але їх вплив зменшується шляхом усереднення результатів.

За способом подання похибки розрізняють **абсолютну** та **відносну** похибки. Абсолютна похибка виражається в одиницях вимірюваної величини, тоді як відносна похибка визначається як відношення абсолютної похибки до вимірюваного значення і часто подається у відсотках або децибелах.

У телекомунікаційних системах **джерела похибок** мають як апаратний, так і методичний характер. До основних належать похибки вимірювального приладу, зумовлені обмеженою роздільною здатністю, власними шумами та неточністю еталонів. Значний внесок роблять з'єднувальні елементи – кабелі, роз'єми, перехідники, які вносять додаткові втрати та відбиття.

Окрему групу становлять методичні похибки, пов'язані з некоректним вибором режиму вимірювання, смуги пропускання, часу усереднення або тестового сигналу. У телекомунікаціях також важливими є впливи навколишнього середовища – температурні зміни, електромагнітні завади та нестабільність живлення.

Невизначеність вимірювання характеризує інтервал значень, у межах якого з певною ймовірністю знаходиться істинне значення величини. Вона визначається на основі статистичного аналізу результатів та характеристик вимірювальних засобів.

Розрізняють **стандартну невизначеність**, яка оцінюється для окремого джерела впливу, та **зведену невизначеність**, що враховує всі незалежні складові. У практиці телекомунікаційних вимірювань невизначеність часто задається виробником приладу або визначається під час калібрування.

Поняття невизначеності є особливо важливим при порівнянні результатів вимірювань, виконаних різними приладами або в різних лабораторіях, а також при перевірці відповідності параметрів стандартам і технічним вимогам.

Достовірність вимірювання визначає ступінь довіри до отриманого результату та його придатність для прийняття інженерних рішень. Вона залежить не лише від точності приладу, але й від правильності методики, умов вимірювання та компетентності оператора.

У телекомунікаціях достовірність особливо критична, оскільки рішення про придатність каналу, введення системи в експлуатацію або пошук несправності безпосередньо ґрунтуються на результатах вимірювань. Неправильно інтерпретований або недостовірний результат може призвести до хибних технічних висновків.

Основними умовами забезпечення достовірності є регулярне калібрування приладів, використання перевірених методик, контроль умов вимірювання та аналіз отриманих даних з урахуванням похибок і невизначеності.

Тема 2. Інструментальні вимірювання у волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ)

Роль інструментальних вимірювань у ВОЛЗ. Основні параметри, що вимірюються у ВОЛЗ. Загальні принципи вимірювання в оптичних системах. Основні інструменти вимірювання в оптичних системах

2.1 Особливості інструментальних вимірювань у ВОЛЗ

Волоконно-оптичні лінії зв'язку суттєво відрізняються від традиційних електричних ліній не лише фізичним середовищем передавання сигналу, але й підходами до інструментальних вимірювань. У ВОЛЗ інформація передається у вигляді світлового випромінювання, тому безпосередній контроль струмів, напруг або імпедансів є неможливим. Натомість основними вимірюваними величинами стають оптична потужність та загасання сигналу.

Особливістю вимірювань у ВОЛЗ є те, що більшість параметрів оцінюється не безпосередньо, а шляхом порівняння рівнів оптичної потужності на вході та виході досліджуваної лінії. Саме тому вимірювання виконуються в логарифмічних одиницях –децибелах, що дозволяє зручно оцінювати навіть дуже малі зміни рівня сигналу на великих відстанях.

Ще однією важливою особливістю є залежність результатів вимірювань від довжини хвилі випромінювання, стану з'єднань, чистоти оптичних конекторів і стабільності джерела світла. Це вимагає чіткого дотримання методики вимірювання та використання спеціалізованих приладів –оптичного тестового генератора та оптичного вимірювача потужності.

Одним із найпоширеніших і базових методів оцінювання параметрів ВОЛЗ є метод передавання (Transmission Method). Він широко застосовується під час монтажу, введення в експлуатацію та технічного обслуговування оптичних ліній і дозволяє визначати сумарні втрати сигналу між двома точками волоконно-оптичної системи.

2.2 Основні параметри, що вимірюються у волоконно-оптичних лініях зв'язку

Інструментальні вимірювання у волоконно-оптичних лініях зв'язку спрямовані на кількісну оцінку параметрів, які безпосередньо визначають працездатність, надійність та якість передавання інформації. На відміну від електричних ліній, у

ВОЛЗ неможливо виконувати прямі вимірювання електричних величин, тому контроль стану лінії здійснюється за параметрами оптичного сигналу.

Оптична потужність є базовим вимірюваним параметром у ВОЛЗ і характеризує рівень світлового випромінювання, що передається оптичним волокном. Вона вимірюється у логарифмічних одиницях –дБм, що дозволяє зручно працювати з великим діапазоном значень потужності. Вимірювання оптичної потужності дає змогу оцінити рівень сигналу на виході джерела, після проходження волоконної лінії або на вході приймача, а також контролювати відповідність параметрів обладнання технічним вимогам.

Загасання (втрати) в оптичному волокні. Загасання характеризує зменшення рівня оптичної потужності під час поширення світла в оптичному волокні. Основними фізичними причинами загасання є поглинання та розсіювання світла в матеріалі волокна. Загасання зазвичай нормується в децибелах на кілометр і залежить від довжини хвилі випромінювання. Вимірювання цього параметра дозволяє оцінити якість волокна та максимальну допустиму довжину лінії без використання підсилювачів або регенерації сигналу.

Втрати на з'єднаннях і конекторах. Окрему групу параметрів становлять втрати, що виникають у місцях механічних та зварних з'єднань, а також у роз'ємних оптичних конекторах. Такі втрати зумовлені неточністю юстування, забрудненням торців, неоднорідністю оптичних осей та повітряними зазорами. Навіть за незначної кількості з'єднань їх сумарний внесок у загальні втрати лінії може бути істотним, тому вимірювання втрат на з'єднаннях є обов'язковим етапом перевірки ВОЛЗ.

Сумарні втрати оптичної лінії являють собою різницю між рівнем оптичної потужності на вході та виході досліджуваної ділянки ВОЛЗ. Цей параметр враховує як загасання у волокні, так і втрати на з'єднаннях, конекторах та інших пасивних елементах. Саме сумарні втрати найчастіше визначаються під час експлуатаційних вимірювань методом передавання, оскільки вони безпосередньо пов'язані з енергетичним балансом оптичної системи.

2.3 Загальні принципи та інструменти вимірювання в оптичних системах

Інструментальні вимірювання в оптичних системах зв'язку ґрунтуються на принципово інших фізичних засадах, ніж вимірювання в електричних колах. Це зумовлює як специфіку вимірюваних величин, так і особливі вимоги до застосовуваних приладів та методик.

У волоконно-оптичних системах неможливе безпосереднє вимірювання параметрів передавання інформації, оскільки сигнал має форму світлового

випромінювання, яке поширюється всередині оптичного волокна. У зв'язку з цим більшість параметрів оцінюється **непрямим шляхом** – через вимірювання оптичної потужності на різних ділянках лінії та подальше обчислення втрат. Такий підхід є базовим для більшості експлуатаційних і монтажних вимірювань у ВОЛЗ.

Характерною особливістю оптичних вимірювань є широкі діапазони значень оптичної потужності – від одиниць міліват до надзвичайно малих рівнів сигналу після проходження десятків кілометрів волокна. Тому результати вимірювань зазвичай подаються в **логарифмічних одиницях** – децибелах і децибел-міліватах. Використання логарифмічної шкали спрощує аналіз енергетичного балансу оптичної лінії та дозволяє безпосередньо сумувати втрати окремих елементів системи.

Оптичні параметри волоконно-оптичних ліній істотно залежать від **довжини хвилі** випромінювання. Загасання волокна, чутливість приймачів і характеристики пасивних компонентів мають різні значення в різних спектральних вікнах. Тому під час проведення вимірювань необхідно чітко задавати робочу довжину хвилі вимірювального приладу та забезпечувати її відповідність довжині хвилі реальної системи зв'язку.

Коректність вимірювань у ВОЛЗ значною мірою визначається **стабільністю оптичного джерела**. Зміни рівня випромінюваної потужності або спектральних характеристик джерела безпосередньо впливають на точність результатів. Тому в практиці вимірювань застосовуються спеціалізовані оптичні тестові генератори, здатні формувати стабільне випромінювання заданої довжини хвилі та потужності.

Основні інструменти вимірювання в оптичних системах

Для контролю параметрів ВОЛЗ використовується обмежений, але спеціалізований набір вимірювальних приладів (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Типові інструменти вимірювання ВОЛЗ

Інструмент	Призначення	Основні вимірювальні параметри
OTDR	Діагностика волоконної лінії, локалізація дефектів	Затухання (дБ/км), довжина лінії, втрати на з'єднаннях, відбиття
Оптичний вимірювач потужності	Контроль рівнів оптичного сигналу	Потужність (дБм), втрати тракту
Оптичний тестовий генератор	Формування опорного сигналу	Довжина хвилі, стабільність потужності
Аналізатор спектра (оптичний)	Аналіз спектра випромінювання	Центральна довжина хвилі, спектральна ширина

Базовими з них є оптичний вимірювач потужності та оптичне тестове джерело, які у поєднанні утворюють універсальний комплект для оцінювання загасання і втрат

методом передавання. Для аналізу спектральних характеристик оптичних сигналів застосовується оптичний аналізатор спектра, який дозволяє оцінювати розподіл потужності за довжинами хвиль і контролювати роботу багатоканальних систем.

Практичні вимоги до проведення вимірювань

Під час виконання вимірювань у ВОЛЗ особливу увагу приділяють стану оптичних з'єднань і чистоті конекторів, оскільки навіть незначні забруднення можуть призводити до помітних додаткових втрат. Крім того, необхідно забезпечувати відтворюваність умов вимірювання, фіксацію конфігурації лінії та коректне документування отриманих результатів.

2.4 Вимірювання оптичної потужності та джерела випромінювання у ВОЛЗ

Вимірювання оптичної потужності є **базою волоконно-оптичної метрології**. Практично в кожному приладі для тестування світловодних систем використовується детектор оптичної потужності. Саме з цього виду вимірювань починається оцінювання стану волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Розрізняють два основні типи вимірювань оптичної потужності:

- абсолютні вимірювання оптичної потужності;
- відносні вимірювання оптичної потужності.

Відносні вимірювання застосовуються для визначення **загасання, підсилення, втрат на з'єднаннях**, а також для оцінювання енергетичного балансу лінії. Абсолютні вимірювання використовуються під час роботи з оптичними джерелами, приймачами та підсилювачами. Наприклад, абсолютне значення вихідної потужності оптичного передавача або оптичного підсилювача є критичним параметром для забезпечення необхідного запасу потужності в системі зв'язку.

За фізичним принципом дії оптичні вимірювачі потужності поділяються на **два основні типи**:

- прилади з **тепловими детекторами**;
- прилади з **фотодетекторами**.

У вимірювачах з тепловими детекторами реєструється підвищення температури, спричинене поглинанням оптичного випромінювання. У фотодетекторних приладах падаючі фотони створюють електрон-діркові пари, що приводить до виникнення електричного сигналу, пропорційного оптичній потужності.

Фотодетекторні вимірювачі мають **обмежений спектральний діапазон** і потребують точної абсолютної калібровки, однак саме вони є найпоширенішими завдяки **дуже високій чутливості**. Вимірювачі з тепловими детекторами, навпаки,

характеризуються **широкою та майже рівною спектральною характеристикою**, що робить їх зручними для використання в калібрувальних лабораторіях.

Оптичні тестові джерела випромінювання

Оптичне тестове джерело є стандартним вимірювальним приладом, що використовується разом з оптичним вимірювачем потужності (рис. 2.2) для визначення втрат у волоконно-оптичних лініях як одномодових, так і багатомодових. Такі джерела формують випромінювання на фіксованих довжинах хвиль, які відповідають робочим вікнам телекомунікаційних систем (рис. 2.1).

Типові значення довжин хвиль:

- 650 нм – видиме червоне випромінювання для візуального контролю;
- 1310 нм і 1550 нм – для одномодових волокон;
- 850 нм і 1300 нм – для багатомодових волокон.

Оптичні джерела є одним з найбільш досліджених елементів волоконно-оптичних систем зв'язку. У телекомунікаціях і системах передавання даних застосовуються кілька основних типів джерел.



Рисунок 2.1 – Оптичне тестове джерело випромінювання



Рисунок 2.2 – Оптичний вимірювач потужності

Лазери Фабрі–Перо (FP-лазери)

Лазери Фабрі–Перо є одним з найбільш поширених джерел випромінювання в оптичних системах зв'язку. Вони отримали назву на честь французьких учених Шарля Фабрі та Альфреда Перо. У такому лазері світло багаторазово відбивається між двома напівпрозорими дзеркалами, розташованими на кінцях напівпровідникового кристалу, утворюючи резонатор.

Один з відбивачів є частково прозорим, що дозволяє частині світлової енергії виходити в оптичне волокно. За фізичним змістом такий процес аналогічний роботі резонансного електричного кола з високою добротністю, де внутрішня енергія значно перевищує передану в навантаження.

Лазери з розподіленням зворотним зв'язком (DFB-лазери)

DFB-лазери були розроблені для усунення спектральних недоліків лазерів Фабрі–Перо. В їх структурі використовується дифракційна ґратка Бреґа, що створює розподілений оптичний зворотний зв'язок. Така конструкція забезпечує вузьку спектральну лінію випромінювання та високу стабільність довжини хвилі, що є особливо важливим для багатоканальних систем з ущільненням за довжиною хвилі.

Лазери з вертикальним випромінюванням (VCSEL)

Вертикальні лазери з поверхневим випромінюванням були розроблені як недорога альтернатива FP- та DFB-лазерам. Вони випромінюють світло перпендикулярно до поверхні напівпровідникової підкладки та широко застосовуються у високошвидкісних лініях передавання даних, зокрема в локальних мережах. Характерною особливістю VCSEL є надзвичайно коротка довжина активної області, що обмежує підсилення, але забезпечує компактність і низьке енергоспоживання.

Світлодіодні джерела випромінювання

Для багатомодових волокон широко застосовуються поверхнево-випромінювальні світлодіоди. На відміну від лазерів, у світлодіодах відсутні дзеркала, а випромінювання виникає внаслідок спонтанної рекомбінації електронів і дірок. Світло випромінюється у всіх напрямках, і лише частина його вводиться в оптичне волокно.

Окремий різновид – крайові світлодіоди, які за конструкцією подібні до лазерів без резонатора. Вони формують посилене спонтанне випромінювання і застосовуються в системах, де не вимагається вузька спектральна лінія.

Оптичний вимірювач потужності

Оптичний вимірювач потужності є спеціалізованим приладом, призначеним для вимірювання рівня світлового випромінювання на виході оптичного волокна. Він повинен забезпечувати роботу на відповідній довжині хвилі та в заданому діапазоні потужностей.

У телекомунікаційних мережах передавання даних типовими є рівні потужності:

- від –15 до –35 дБм для багатомодових ліній;
- від 0 до –40 дБм для одномодових ліній.

Більшість вимірювачів підтримують різні типи оптичних конекторів, що спрощує їх використання в польових умовах. Незалежно від роздільної здатності

індикатора, похибка більшості приладів становить приблизно $\pm 5\%$ або близько 0,2 дБ, що обумовлено фізичними обмеженнями передачі еталонів оптичної потужності.

Візуальний локатор пошкоджень оптичного волокна

Оскільки робоче випромінювання в оптичному волокні є невидимим для людського ока, для швидкої перевірки цілісності волокна застосовується **візуальний локатор пошкоджень** (рис. 2.3). Цей простий прилад подає у волокно видиме світло, що дозволяє перевірити наявність з'єднання, ідентифікувати потрібний кабель у пучку та виявити грубі дефекти.

Потужні лазерні локатори дозволяють візуально спостерігати місця з підвищеними втратами –перегини, розриви або неякісні зварювання –навіть через оболонку кабелю, якщо вона частково пропускає світло. Завдяки простоті та низькій вартості візуальні локатори є одним з найдоступніших і найпрактичніших інструментів у наборі для обслуговування ВОЛЗ.



Рисунок 2.3 – Візуальний локатор пошкоджень



Рисунок 2.4 – Ідентифікатор оптичного волокна

Ідентифікатор оптичного волокна (Fiber Optic Identifier)

Ідентифікатор оптичного волокна є спеціалізованим вимірювальним приладом, який дозволяє технічному персоналу **визначати наявність оптичного сигналу та напрям його поширення без розриву волокна**. Прилад працює шляхом створення контрольованого макрозгину оптичного кабелю (рис. 2.4). У результаті частина світлового випромінювання виходить за межі волокна та реєструється фотодіодами, вбудованими в ідентифікатор.

Електронна схема приладу аналізує інтенсивність випромінювання та відображає не лише факт наявності сигналу, а й **напрямок його розповсюдження** в оптичному волокні. Це особливо важливо під час роботи з активними лініями зв'язку.

За принципом застосування ідентифікатор волокна подібний до візуального локатора пошкоджень, однак має дві принципові переваги. По-перше, він фактично «замінює зір оператора», дозволяючи працювати з невидимим інфрачервоним випромінюванням. По-друге, у більшості випадків **немає потреби відключати волокно від передавача або приймача**, тобто вимірювання виконуються без порушення роботи активної системи.

Зазвичай інфрачервоного випромінювання, що поширюється волокном у штатному режимі, достатньо для виконання ідентифікації. У складніших випадках для діагностики може використовуватися додаткове зовнішнє інфрачервоне джерело.

Волоконно-оптичний переговорний комплект

У процесі монтажу та налагодження ВОЛЗ часто виникає потреба в **оперативному зв'язку між технічними спеціалістами**, які знаходяться на різних кінцях однієї й тієї ж лінії. Для цього застосовується волоконно-оптичний переговорний комплект.

Такий комплект складається з передавача та приймача, які підключаються безпосередньо до вільних або резервних волокон кабелю. Передавання голосової інформації здійснюється по оптичному волокну в **повнодуплексному режимі**, що забезпечує зручний двосторонній зв'язок без використання зовнішніх засобів комунікації.

Волоконно-оптичні переговорні комплекти є **недорогим і ефективним рішенням** для організації зв'язку під час тестування як одномодових, так і багатомодових волокон.

2.5 Оптичний спектральний аналіз

Оптичний спектральний аналіз полягає у вимірюванні **оптичної потужності як функції довжини хвилі**. Спектр джерела випромінювання є одним з ключових параметрів волоконно-оптичних систем зв'язку.

Ширина спектра безпосередньо впливає на **хроматичну дисперсію** в оптичному волокну, яка, у свою чергу, обмежує максимальну швидкість передавання інформації. У часовій області дія хроматичної дисперсії проявляється у вигляді розширення імпульсів цифрового сигналу. Оскільки величина дисперсії залежить від спектральної ширини джерела, для високошвидкісних систем бажаними є **вузькоспектральні джерела випромінювання**.

Широке впровадження систем спектрального ущільнення каналів (WDM) зробило оптичний спектральний аналіз **обов'язковим елементом сучасних**

телекомунікаційних мереж, а функції аналізу спектра дедалі частіше інтегруються безпосередньо в мережеве обладнання.

Оптичний аналізатор спектра (OSA) дозволяє спостерігати розподіл потужності за довжинами хвиль. Наприклад, для лазера типу Фабрі–Перо характерна наявність набору поздовжніх мод, які займають спектральний інтервал у десятки нанометрів. За формою спектра, міжмодовою відстанню та розподілом потужності можна робити висновки щодо довжини резонатора та когерентних властивостей лазера.



Рисунок 2.5 – Волоконно-оптичний переговорний комплект



Рисунок 2.6 – Оптичний аналізатор спектра

Типи оптичних аналізаторів спектра

OSA на основі інтерферометра Фабрі–Перо

Інтерферометр Фабрі–Перо складається з двох паралельних дзеркал з високим коефіцієнтом відбиття, які утворюють резонатор. Така структура працює як вузькосмуговий спектральний фільтр. Спектральна роздільна здатність визначається відбивною здатністю дзеркал та відстанню між ними.

Перевагою цього типу аналізаторів є **дуже висока спектральна роздільна здатність** і відносна простота конструкції. Недоліком є наявність повторюваних смуг пропускання, інтервал між якими визначається вільним спектральним діапазоном. Для усунення цієї проблеми часто застосовують додаткові фільтри.

OSA на основі інтерферометра Мікельсона

Аналізатори спектра цього типу ґрунтуються на інтерференції сигналу з його затриманою копією. Вхідний сигнал розділяється на два плеча – з фіксованою та змінною довжиною. На виході формується інтерференційна картина, або інтерферограма, яка є автокореляційною функцією сигналу.

Головною особливістю таких приладів є можливість **безпосереднього вимірювання довжини когерентності** та надзвичайно висока точність визначення довжини хвилі – до часток пікометра. Спектр сигналу отримують шляхом математичного перетворення Фур'є інтерферограми.

До недоліків слід віднести менший динамічний діапазон і неможливість використання в задачах, де необхідний класичний смуговий фільтр.

OSA на основі дифракційної ґратки

Найпоширенішими в телекомунікаційних застосуваннях є аналізатори спектра з дифракційною ґраткою. У таких приладах ґратка розділяє світло за довжинами хвиль, подібно до призми у видимому діапазоні. Для інфрачервоного випромінювання саме дифракційні ґратки забезпечують достатню дисперсію та високу спектральну роздільну здатність.

Кут повороту ґратки визначає довжину хвилі, на яку налаштований аналізатор, а ширина спектрального вікна задається геометрією оптичної системи та розмірами апертур.

2.6 Вимірювання довжини хвилі

Вимірювачі довжини хвилі призначені для **надточного визначення спектрального положення оптичного сигналу**. Якщо стандартний аналізатор спектра забезпечує точність порядку $\pm 0,1$ нм, то вимірювач довжини хвилі дозволяє досягати точності кращої за $\pm 0,001$ нм.

Така точність є критичною, зокрема:

- під час дослідження довготривалого дрейфу довжини хвилі лазерів DFB у WDM-системах;
- при вимірюванні хроматичної дисперсії та визначенні довжини хвилі нульової дисперсії оптичних компонентів.

Для високоточного вимірювання довжини хвилі застосовуються фільтраційні, інтерферометричні та дискримінаційні методи. Найбільш поширеним є **інтерферометр Мікельсона**, у якому довжина хвилі визначається шляхом аналізу інтерференційних коливань при зміні довжини одного з плечей інтерферометра.

Тема 3. Оптична рефлектометрія у часовій області (OTDR)

Роль OTDR у волоконно-оптичних телекомунікаційних мережах. Принцип дії OTDR. Фізичні основи формування OTDR-сигналу. Інтерпретація OTDR-траси та типи подій. «Мертві зони» OTDR та їх вплив на вимірювання.

3.1 Роль OTDR у волоконно-оптичних телекомунікаційних мережах

Волоконно-оптичні лінії зв'язку є базовою транспортною інфраструктурою сучасних телекомунікаційних мереж – від локальних та корпоративних систем до магістральних і доступових мереж. Для забезпечення надійної роботи таких ліній необхідні спеціалізовані інструментальні засоби, які дозволяють не лише вимірювати інтегральні параметри каналу, але й аналізувати просторовий розподіл втрат та неоднорідностей уздовж волокна.

Оптичний рефлектометр у часовій області (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer) займає центральне місце серед інструментальних засобів вимірювання волоконно-оптичних ліній зв'язку. На відміну від вимірювачів оптичної потужності або джерел випромінювання, які дозволяють оцінити лише сумарні втрати каналу між двома кінцями, OTDR забезпечує **просторово-роздільне дослідження волокна** з прив'язкою вимірюваних параметрів до відстані.

Основними завданнями OTDR у телекомунікаційних мережах є введення волоконно-оптичних ліній в експлуатацію, контроль якості монтажу, виявлення та ідентифікація зварних з'єднань і конекторів, локалізація місць підвищених втрат, а також оперативна діагностика пошкоджень у процесі експлуатації. За допомогою OTDR можна визначити довжину волоконної ділянки, загальні втрати, коефіцієнт загасання волокна, рівень відбиттів та оптичне зворотне відбиття лінії.

Ключовою перевагою OTDR є можливість **одностороннього вимірювання**, тобто проведення тестування з доступом лише до одного кінця волоконно-оптичної лінії. Це має принципове значення для магістральних, доступових та розгалужених мереж, де фізичний доступ до віддаленого кінця лінії часто є ускладненим або неможливим. Саме ця особливість робить OTDR основним інструментом аварійно-відновлювальних робіт і експлуатаційної діагностики.

За принципом дії OTDR часто порівнюють з **одновимірною радіолокаційною системою**, де роль зонduючого імпульсу виконує короткий оптичний сигнал, а аналіз відбитого та розсіяного випромінювання дозволяє отримати «профіль» волоконної лінії вздовж її довжини.

3.2 Принцип дії OTDR

Принцип роботи оптичного рефлектометра у часовій області базується на аналізі взаємодії коротких оптичних імпульсів з волоконно-оптичною лінією та реєстрації сигналів, що повертаються до приладу внаслідок розсіювання та відбиття світла.

У процесі вимірювання OTDR формує короткий оптичний імпульс заданої тривалості та вводить його в досліджуване оптичне волокно. Імпульс поширюється вздовж волокна зі швидкістю, що визначається показником заломлення середовища. У міру проходження волокна частина енергії імпульсу безперервно повертається до приймача OTDR внаслідок релеївського зворотного розсіювання, а на межах із різкою зміною показника заломлення виникають локальні відбиті сигнали (рис. 3.1).

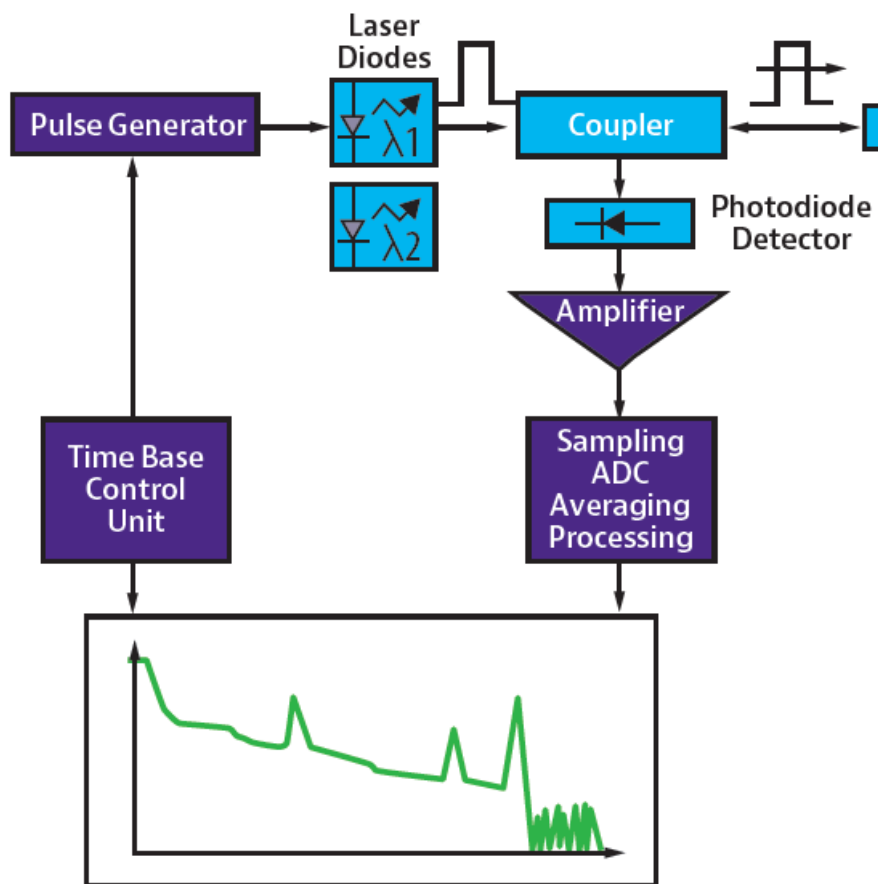


Рисунок 3.1 – OTDR-вимірювання у вигляді OTDR-траси, яка є графічним відображенням рівня оптичного сигналу як функції відстані вздовж волокна.

Час затримки між моментом випромінювання імпульсу та моментом реєстрації поверненого сигналу є пропорційним відстані до відповідної ділянки волокна. Таким чином, OTDR здійснює **перетворення часу проходження оптичного сигналу у відстань**, що дозволяє визначити просторове положення кожної події вздовж лінії.

Оскільки рівень зворотно розсіяного сигналу є дуже малим, вимірювання виконуються шляхом багаторазового повторення імпульсів та усереднення

результатів. Усереднення дозволяє підвищити відношення сигнал/шум і отримати стабільну та інформативну OTDR-трасу без суттєвого впливу випадкових флуктуацій.

Після завершення процесу збору даних у приладі виконується цифрове оброблення сигналу, результатом якого є формування **OTDR-траси** – графіка залежності рівня зворотного сигналу від відстані. На основі аналізу цієї траси автоматично або вручну формується **таблиця подій**, у якій для кожного виявленого елемента лінії (з'єднання, зварки, вигину, обриву) визначаються його координата, величина втрат і рівень відбиття.

Таким чином, OTDR поєднує функції генератора оптичних імпульсів, високочутливого приймача, системи часової синхронізації та цифрової обробки сигналів, забезпечуючи комплексний інструментальний аналіз волоконно-оптичних ліній зв'язку.

3.3 Фізичні основи формування OTDR-сигналу

Інформаційні можливості оптичного рефлектометра у часовій області визначаються фізичними процесами взаємодії оптичного випромінювання з матеріалом волокна та його структурними неоднорідностями. Усі сигнали, які реєструє OTDR, формуються за рахунок двох принципово різних механізмів: релєївського зворотного розсіювання та френелівських відбиттів.

3.3.1 Релєївське зворотне розсіювання

Релєївське зворотне розсіювання є фундаментальним фізичним явищем, яке виникає під час поширення світла в оптичному волокні. Його причиною є наявність мікроскопічних флуктуацій показника заломлення в скляному матеріалі волокна, зумовлених неоднорідностями структури, домішками та термічними коливаннями. Коли оптичний імпульс проходить через волокно, ці неоднорідності викликають розсіювання частини світлової енергії у різних напрямках, у тому числі й у напрямку до джерела випромінювання.

Саме зворотно розсіяна компонента сигналу безперервно повертається до приймача OTDR вздовж усієї довжини волокна. Рівень цього сигналу є відносно малим, однак достатнім для формування інформативної картини загасання за умови багаторазового усереднення. Релєївське розсіювання не пов'язане з локальними дефектами або з'єднаннями, а є властивістю самого волокна як фізичного середовища.

Інтенсивність релєївського зворотного розсіювання безпосередньо пов'язана з коефіцієнтом загасання оптичного волокна. У міру поширення імпульсу його

потужність зменшується внаслідок поглинання та розсіювання, що призводить до поступового зниження рівня зворотно розсіяного сигналу. У логарифмічному масштабі це зниження має майже лінійний характер, тому на OTDR-трасі релєївське розсіювання відображається у вигляді **похилої лінійної ділянки**, нахил якої визначається питомими втратами волокна, зазвичай вираженими в дБ/км.

Аналіз нахилу цієї лінійної ділянки дозволяє визначити коефіцієнт загасання волокна на заданій довжині хвилі, а також виявити нерівномірності, що можуть бути наслідком вигинів або локальних механічних впливів (рис. 3.2). Таким чином, релєївське зворотне розсіювання є основним джерелом інформації для оцінювання розподілених параметрів волоконно-оптичної лінії.

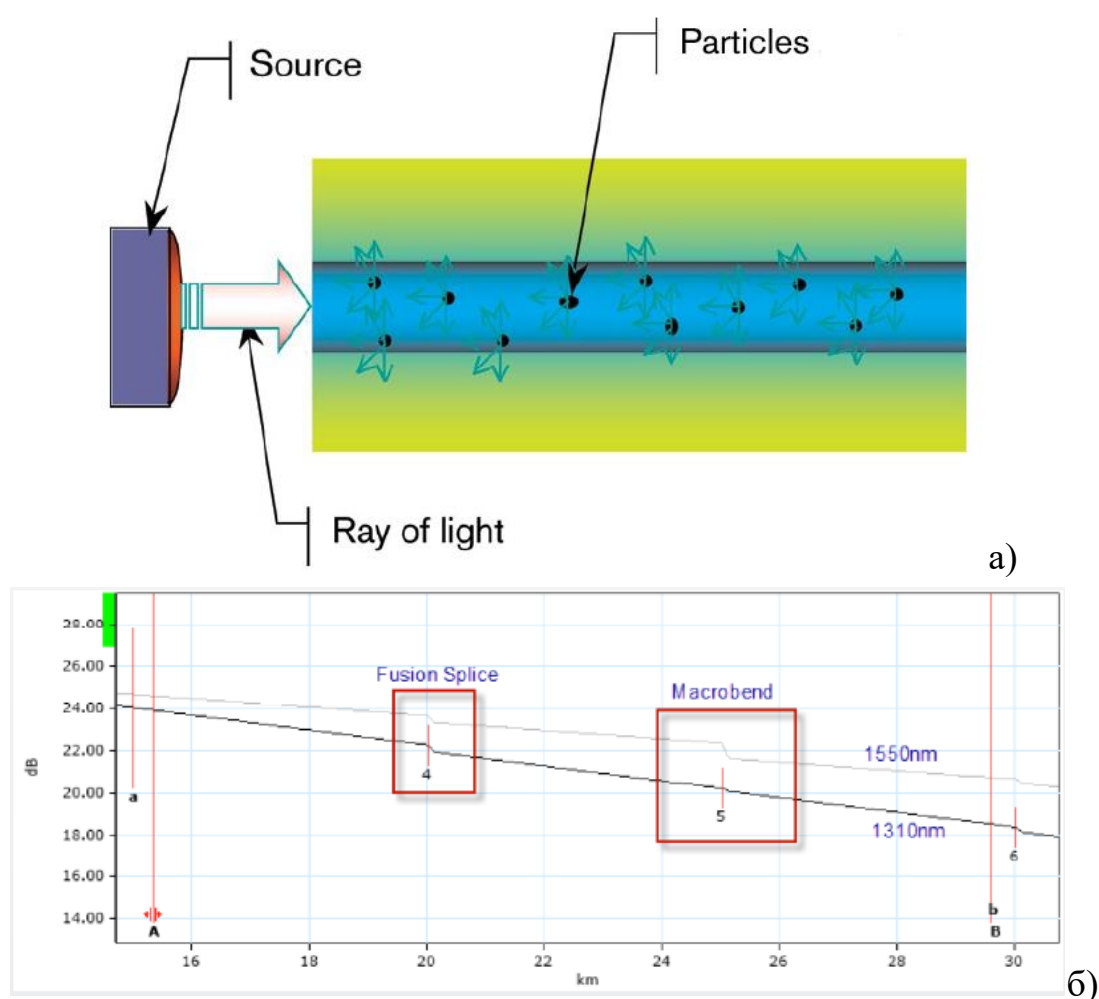


Рисунок 3.2 – Релєївське зворотне розсіювання в оптичному волокні а) та його відображення на OTDR-трасі б)

3.3.2. Френелівські відбиття

На відміну від релєївського розсіювання, яке є розподіленим уздовж усієї довжини волокна, френелівські відбиття мають локальний характер і виникають у місцях різкої зміни показника заломлення. Фізичною причиною цього явища є часткове відбиття світлової хвилі на межі двох середовищ з різними оптичними

властивостями, наприклад на межі «скло–повітря» або «скло–скло» з порушеним оптичним контактом.

У волоконно-оптичних лініях френелівські відбиття спостерігаються на конекторних з'єднаннях, механічних стиках, оптичних розгалужувачах, а також у місцях обриву волокна або відкритих кінців. Інтенсивність таких відбиттів може у багато разів перевищувати рівень релеївського зворотного розсіювання, що призводить до появи на OTDR-трасі характерних різких піків (рис.3.3).

Френелівські відбиття відіграють подвійну роль у OTDR-вимірюваннях. З одного боку, вони є інформативними маркерами положення з'єднань, кінця волокна або серйозних дефектів. З іншого боку, надмірно сильні відбиття можуть призводити до перевантаження приймача та формування так званих «мертвих зон», у межах яких неможливо коректно аналізувати наступні події.

У практиці інтерпретації OTDR-трас френелівські відбиття ідентифікуються за наявністю вузьких піків, після яких часто спостерігається різка зміна рівня сигналу. За амплітудою та формою таких піків можна зробити висновки про тип події, якість з'єднання та можливу наявність дефектів монтажу.



Рисунок 3.3 – Френелівські відбиття, спричинені різними типами подій у ВОЛЗ

3.4 Інтерпретація OTDR-траси та типи подій

OTDR-траса є графічним поданням залежності рівня зворотного оптичного сигналу від відстані вздовж волоконно-оптичної лінії. Коректна інтерпретація цієї траси дозволяє не лише оцінити загальні параметри лінії, але й ідентифікувати окремі елементи та дефекти, що виникають у процесі монтажу або експлуатації.

Усі події, що фіксуються на OTDR-трасі, умовно поділяються на **відбивні** та **невідбивні**. Такий поділ ґрунтується на фізичному механізмі формування сигналу та характері його відображення на трасі.

Відбивні події супроводжуються появою френелівського відбиття і проявляються на трасі у вигляді вузьких піків значної амплітуди. До цієї групи належать конекторні з'єднання, механічні стики, оптичні розгалужувачі, а також обриви волокна або відкриті кінці лінії. Відбивні події забезпечують чітку просторову прив'язку, однак можуть ускладнювати аналіз сусідніх ділянок через насичення приймача OTDR.

Невідбивні події не супроводжуються значним відбиттям і проявляються на OTDR-трасі як ступінчасте зниження рівня сигналу або зміна нахилу лінійної ділянки. Типовими прикладами є зварні з'єднання, локальні механічні деформації волокна, а також мікро- та макровигини. Для таких подій основною інформативною ознакою є величина додаткових втрат, а не наявність піка відбиття.

Особливу увагу під час інтерпретації слід приділяти розрізненню **зварних з'єднань і макровигинів**, оскільки обидва типи подій можуть виглядати подібно на однохвильовій OTDR-трасі. Зварне з'єднання, як правило, створює локальні втрати, що майже не залежать від довжини хвилі. Натомість макровигини характеризуються істотною спектральною залежністю: втрати на більших довжинах хвиль (наприклад, 1550 нм) значно перевищують втрати на коротших (1310 нм).

Для надійного розпізнавання таких дефектів застосовується **двоххвильове OTDR-тестування**, під час якого вимірювання виконуються на двох різних довжинах хвиль. Порівняльний аналіз трас дозволяє відрізнити зварні з'єднання від вигинів волокна та коректно визначити природу втрат.

3.5 «Мертві зони» OTDR та їх вплив на вимірювання

Під час аналізу OTDR-трас важливим обмежувальним чинником є наявність так званих **мертвих зон**. Мертва зона – це ділянка волоконно-оптичної лінії після потужної відбивної події, у межах якої приймач OTDR тимчасово не здатний коректно реєструвати зворотний сигнал. Причиною цього є перевантаження фотоприймача внаслідок інтенсивного френелівського відбиття та необхідність часу для його відновлення.

Розрізняють два основні типи мертвих зон: подієву та мертву зону за загасанням. Кожна з них має різний фізичний зміст і по-різному впливає на результати вимірювань.

3.5.1 Мертва зона вимірювання подій

Подієва мертва зона визначає мінімальну відстань після відбивної події, на якій OTDR здатний **виявити наступну подію**. У межах цієї зони прилад може зафіксувати

наявність зміни сигналу, але не здатний коректно розділити дві близько розташовані події або визначити втрати кожної з них окремо (рис. 3.4).

Якщо відстань між двома відбивними подіями є меншою за подієву мертву зону, OTDR відображає їх як одну об'єднану подію з сумарними характеристиками. Це особливо критично для коротких ліній, внутрішніх мереж і ділянок із великою кількістю конекторів, де події можуть бути розташовані на дуже малих відстанях одна від одної.

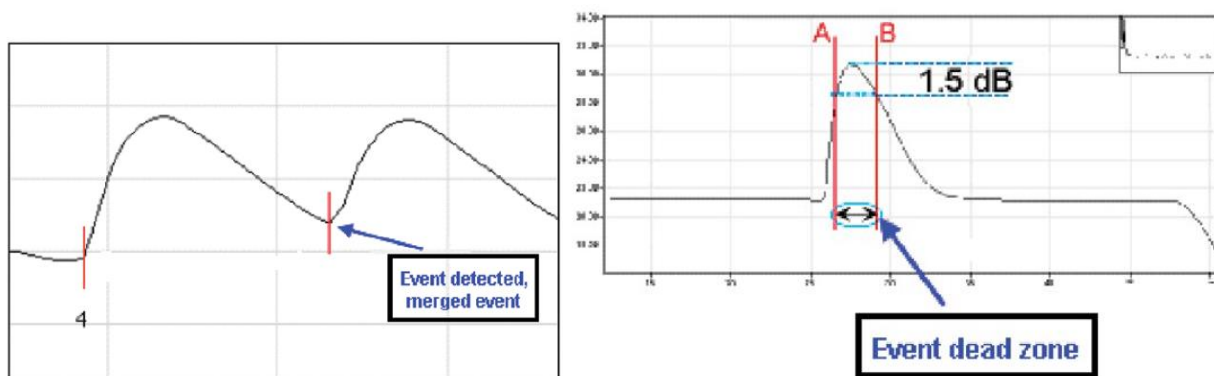


Рисунок 3.4 – Об'єднання близько розташованих подій внаслідок великої подієвої мертвої зони

Подієва мертва зона зазвичай визначається за стандартним критерієм рівня сигналу, наприклад на рівні $-1,5$ дБ від максимуму відбиття, що дозволяє уніфікувати оцінювання цього параметра.

3.5.2 Мертва зона за загасанням

Мертва зона за загасанням характеризує мінімальну відстань після відбивної події, на якій OTDR здатний **достовірно виміряти втрати наступної невідбивної події**, наприклад зварного з'єднання або вигину волокна. На відміну від подієвої мертвої зони, у цьому випадку подія може бути виявлена, але її втрати не можуть бути точно оцінені через нестабільність рівня зворотного сигналу (рис. 3.5).

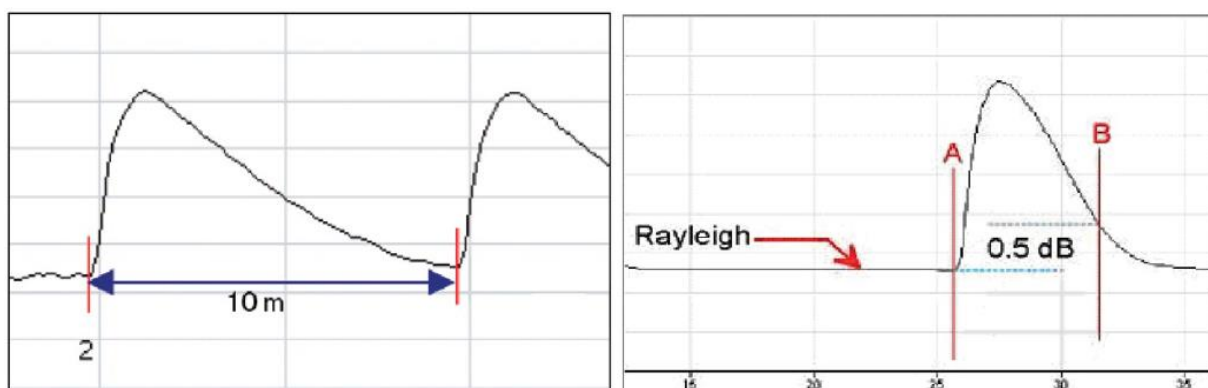


Рисунок 3.5 – Мертва зона за згасанням та її вимірювання

Мертва зона за загасанням є, як правило, більшою за подієву та суттєво впливає на вимірювання коротких ділянок волокна, патч-кордів і монтажних з'єднань. Її величина залежить від тривалості імпульсу та рівня відбиття попередньої події.

3.6 Динамічний діапазон OTDR

Одним із ключових параметрів оптичного рефлектометра у часовій області є динамічний діапазон, який визначає граничні можливості приладу щодо аналізу волоконно-оптичних ліній великої протяжності або з високими втратами. Фізично динамічний діапазон характеризує максимальну різницю між рівнем зворотно розсіяного сигналу на вході OTDR та рівнем шуму приймального тракту, за якої ще можливе достовірне вимірювання.

Іншими словами, динамічний діапазон показує, яку максимальну сумарну оптичну втрату може «подолати» OTDR під час аналізу лінії. Чим більшим є цей параметр, тим на більшу відстань може бути виконане вимірювання та тим складніші за структурою ділянки мережі можуть бути проаналізовані. Динамічний діапазон зазвичай виражається в децибелах і нормується для конкретної довжини хвилі та режиму вимірювання.

Існує прямий зв'язок між динамічним діапазоном OTDR і максимальною довжиною волоконно-оптичної лінії, доступної для вимірювання. За фіксованого коефіцієнта загасання волокна збільшення динамічного діапазону призводить до пропорційного зростання максимальної вимірюваної відстані. У практиці часто використовується наближена оцінка, за якою максимально досяжна довжина лінії визначається відношенням динамічного діапазону OTDR до питомих втрат волокна з урахуванням додаткових втрат на з'єднаннях.

На реальні можливості OTDR суттєво впливають дискретні втрати, зумовлені наявністю зварних з'єднань, конекторів, механічних стиків, а також оптичних сплітерів у мережах типу PON. Кожен такий елемент зменшує доступний запас динамічного діапазону і, відповідно, скорочує максимальну відстань, на якій можна коректно виконати вимірювання. Особливо значний вплив мають пасивні розгалужувачі, втрати в яких можуть досягати десятків децибел.

У таблиці 3.1 показано, що збільшення динамічного діапазону навіть на кілька децибел призводить до істотного розширення діапазону вимірювань, особливо для одномодових волокон на довжині хвилі 1550 нм.

Таблиця 3.1 – Зв’язок динамічного діапазону OTDR та максимальної довжини вимірювання

Довжина хвилі, нм	1310	1550	1310	1550	1310	1550	1310	1550
Динамічний діапазон, дБ	35	35	40	40	45	45	50	50
Типова максимальна дальність OTDR-вимірювання, км	80	125	95	150	110	180	125	220

3.7 Тривалість імпульсу та компроміс «роздільна здатність – дальність»

Важливим параметром, тісно пов’язаним із динамічним діапазоном, є **тривалість оптичного імпульсу**, який формується OTDR. Тривалість імпульсу визначає кількість енергії, що вводиться у волокно, а отже, впливає як на досяжну дальність вимірювання, так і на просторову роздільну здатність.

Короткі імпульси мають невелику енергію, але забезпечують високу просторову роздільну здатність та мінімальні мертві зони (рис. 3.6). Вони застосовуються для аналізу коротких ліній і ділянок із щільно розташованими подіями, зокрема у внутрішніх мережах та дата-центрах. Натомість довгі імпульси несуть значно більшу енергію, що дозволяє досягати великих відстаней вимірювання, однак супроводжується зростанням мертвих зон і погіршенням здатності розділяти близькі події.

Таким чином, у OTDR-вимірюваннях завжди існує компроміс між роздільною здатністю та дальністю. Неможливо одночасно забезпечити максимальну дальність і мінімальні мертві зони в одному режимі вимірювання.



Рисунок 3.6 – Порівняння короткого та довгого імпульсів за енергією, мертвими зонами та досяжною дальністю

Сучасні OTDR, як правило, оснащуються режимом автоматичного вибору параметрів, у якому прилад самостійно визначає оптимальну тривалість імпульсу та час усереднення на основі попереднього аналізу лінії. Такий режим є зручним для оперативних вимірювань, однак у навчальному процесі доцільно приділяти увагу ручному налаштуванню параметрів з метою кращого розуміння фізичних обмежень методу.

3.8 Просторова роздільна здатність та дискретизація

Просторова роздільна здатність OTDR визначається мінімальною відстанню між двома точками вздовж волокна, які можуть бути розрізнені як окремі події. Одним з основних чинників, що впливають на цей параметр, є крок дискретизації, тобто відстань між сусідніми точками вимірювання, у яких фіксується рівень зворотного сигналу (рис. 3.7).

Чим меншим є крок дискретизації, тим вищою є точність локалізації подій та тим детальнішою є OTDR-траса. Однак зменшення кроку дискретизації потребує більшої кількості вимірювальних точок, що може призводити до збільшення обсягу даних та часу оброблення. На практиці крок дискретизації пов'язаний із вибраним діапазоном відстаней та тривалістю імпульсу.

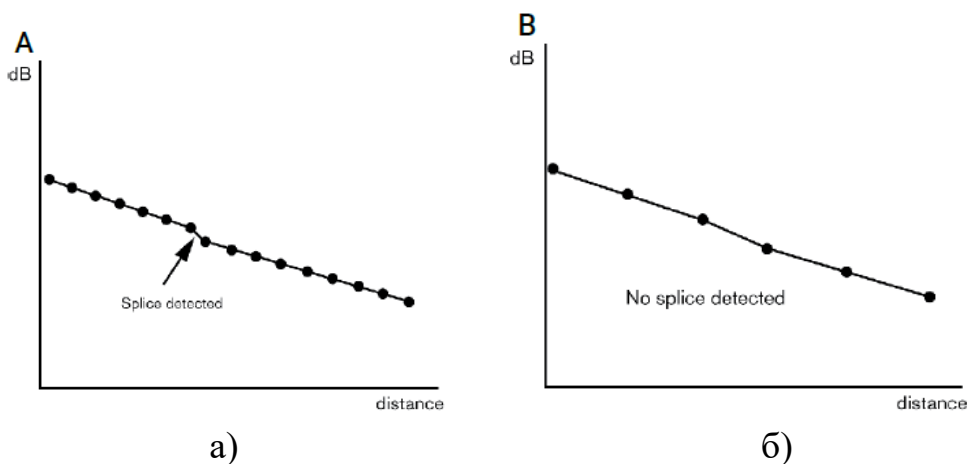


Рисунок 3.7 – Вплив просторової роздільної здатності на ефективність виявлення несправностей: (а) роздільна здатність 5 м (вища роздільна здатність); (б) роздільна здатність 15 м (нижча роздільна здатність)

Недостатня просторова роздільна здатність може призводити до ситуації, коли локальні події залишаються непоміченими або зливаються з фоновією лінійною ділянкою релеївського розсіювання. Це особливо критично під час аналізу коротких ліній або ділянок із близько розташованими з'єднаннями.

Тема 4. Інструментальні вимірювання параметрів антенно-фідерних трактів

Антенно-фідерний тракт як об'єкт вимірювань. Кабельний рефлектометр (TDR) у вимірюваннях фідерів. Аналізатор антен як засіб контролю узгодження. Вимірювання радіочастотної потужності. Комплексне застосування приладів при діагностиці АФТ

4.1 Особливості інструментальних вимірювань антенно-фідерних трактів

Антенно-фідерний тракт (АФТ) – це сукупність елементів, що забезпечують передавання радіочастотної енергії між передавачем (приймачем) та антеною. До складу АФТ входять фідерні лінії (лінії передачі), роз'єми, узгоджувальні елементи та антена як навантаження (рис. 4.1). Антенно-фідерний тракт є ключовою частиною радіотехнічної системи, оскільки саме він забезпечує передавання електромагнітної енергії від передавача до антени та приймання сигналу від антени до приймача. На відміну від багатьох інших вузлів телекомунікаційної апаратури, антенно-фідерний тракт часто працює в умовах відкритого середовища, значних механічних та кліматичних впливів, а також під дією високочастотних і високопотужних сигналів. Це зумовлює підвищені вимоги до контролю його параметрів і стану.

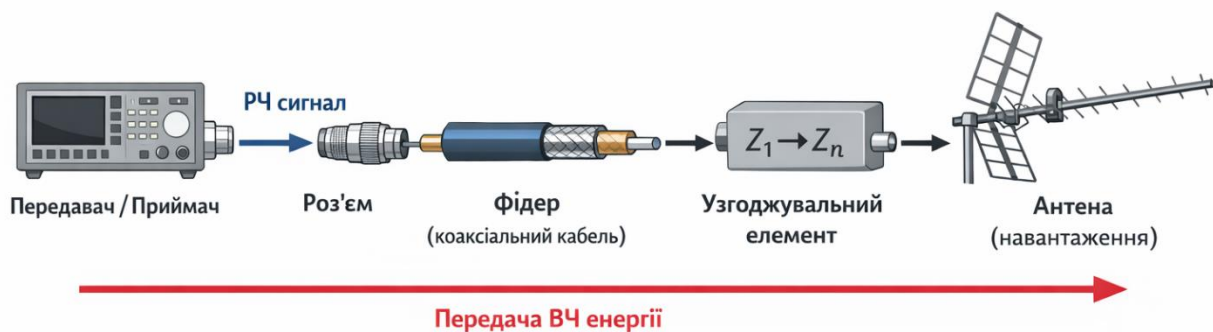


Рисунок 4.1 – Структура антенно-фідерного тракту

Особливістю АФТ є те, що він працює в режимі біжучих електромагнітних хвиль, а його параметри суттєво залежать від частоти, геометрії та стану ліній передачі. Тому вимірювання в АФТ не зводяться до контролю напруг або струмів, а базуються на аналізі відбиття, узгодження та розподілу потужності. Ключовим параметром є **хвильовий опір лінії** – характеристика лінії передачі, що визначає співвідношення між напругою і струмом біжучої хвилі та залежить від геометрії й діелектрика.

Базовим поняттям для аналізу антенно-фідерних трактів є **узгодження** між джерелом сигналу, фідерною лінією та антеною. Узгодження означає рівність хвильового опору лінії та вхідного опору навантаження. У разі порушення узгодження частина енергії відбивається назад у напрямку джерела, що призводить до зростання відбитої потужності, появи стоячих хвиль та додаткових втрат (рис. 4.2).

Для кількісного опису цього явища використовується коефіцієнт відбиття, який визначається як відношення амплітуди відбитої хвилі до амплітуди падаючої. На практиці частіше застосовується коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХ, VSWR), який пов'язаний із коефіцієнтом відбиття і є зручним інженерним показником якості узгодження. Значення КСХ, близьке до одиниці, відповідає хорошему узгодженню, тоді як його зростання свідчить про наявність відбиттів і втрат у тракті.

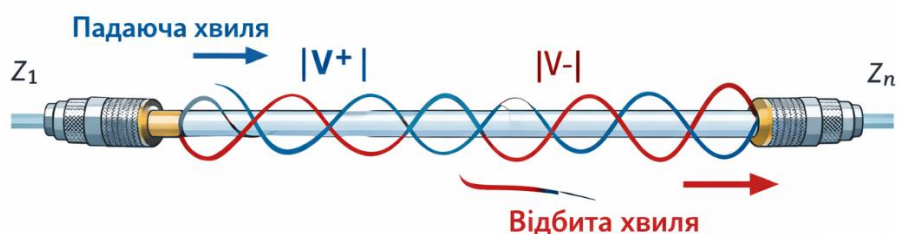


Рисунок 4.2 – Поширення падаючої та відбитої хвиль у фідерній лінії

Ще однією важливою особливістю антенно-фідерних трактів є **наявність локальних неоднорідностей** – роз'ємів, з'єднань, перегинів кабелю, ділянок з механічними пошкодженнями або зміною хвильового опору. Такі неоднорідності не завжди суттєво змінюють загальний рівень КСХ, але можуть викликати локальні відбиття та деградацію характеристик системи. Таким чином, на відміну від низькочастотних кіл, параметри АФТ залежать від частоти сигналу; змінюються вздовж довжини фідера; чутливі до локальних неоднорідностей (заломів, корозії, дефектів роз'ємів). Це зумовлює дві принципово різні групи вимірювань:

- **Частотні вимірювання** – оцінка узгодження, резонансів та смуги пропускання.

- **Просторові (часові) вимірювання** – локалізація дефектів та неоднорідностей уздовж фідерної лінії.

В антенно-фідерних трактах зазвичай вимірюють:

- хвильовий опір та узгодження;
- КСХ у робочій смузі частот;
- загасання та втрати у фідері;
- відстань до дефектів і неоднорідностей;

– передану та відбиту радіочастотну потужність.

Жоден окремий параметр не дає повної інформації про стан АФТ, тому на практиці використовується комплекс приладів, кожен з яких вирішує свою вимірювальну задачу.

4.2 Кабельний рефлектометр (TDR) у вимірюваннях фідерів

Кабельний рефлектометр (Time Domain Reflectometer, TDR) є спеціалізованим вимірювальним приладом, призначеним для аналізу стану фідерних ліній у часовій області (рис. 4.3). Основною задачею TDR є виявлення та локалізація неоднорідностей у кабелі, таких як обриви, короткі замикання, дефектні роз'єми, механічні пошкодження або ділянки зі зміненим хвильовим опором. На відміну від частотних методів, TDR дозволяє отримати просторову інформацію про розподіл параметрів уздовж фідерної лінії.



Рисунок 4.3 – Кабельний рефлектометр

Принцип роботи кабельного рефлектометра базується на явищі відбиття електромагнітних хвиль у лініях з розподіленими параметрами (рис. 4.4). Під час вимірювання TDR формує короткий електричний імпульс або крутий фронт напруги, який подається у фідерну лінію. Імпульс поширюється вздовж кабелю з кінцевою швидкістю, що визначається електричними властивостями середовища та конструкцією лінії.

У разі ідеального узгодження хвильового опору фідера з навантаженням імпульс повністю поглинається і відбиття відсутні. Якщо ж на шляху поширення імпульсу виникає неоднорідність або неузгоджене навантаження, частина енергії відбивається у зворотному напрямку. Відбитий сигнал повертається до входу лінії та реєструється рефлектометром.

Вимірюючи часову затримку між моментом запуску імпульсу та моментом приймання відбитого сигналу, можна визначити відстань до місця неоднорідності. Зв'язок між часовою затримкою та відстанню задається співвідношенням:

$$l = \frac{v \cdot t}{2}, \quad (4.1)$$

де l – відстань до дефекту, v – швидкість поширення хвилі у фідері, t – час між падаючим і відбитим імпульсами. Множник $1/2$ враховує двостороннє проходження сигналу.

Для коректних вимірювань важливо знати коефіцієнт укорочення кабелю, який визначає реальну швидкість поширення сигналу порівняно зі швидкістю світла у вакуумі.

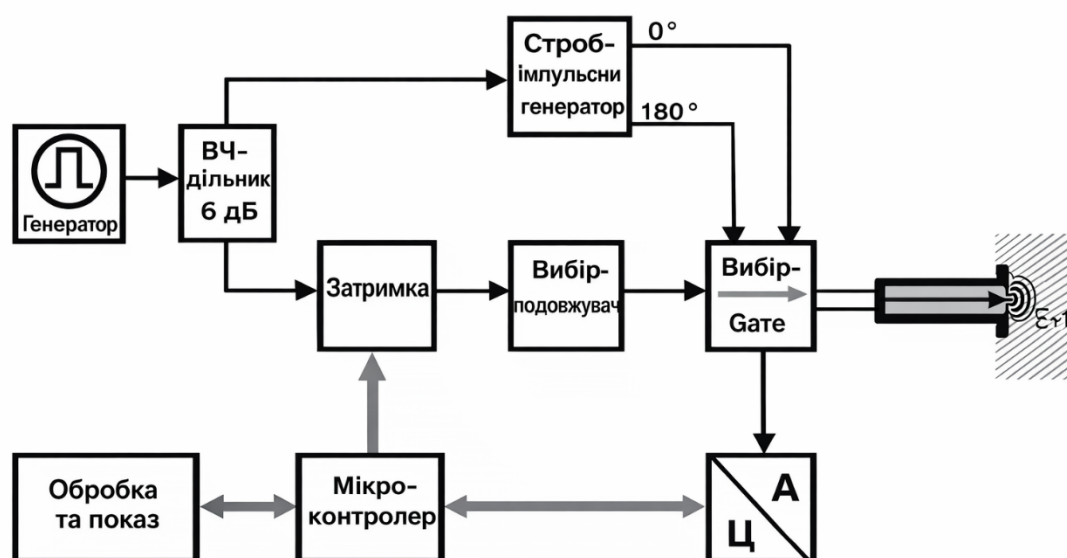


Рисунок 4.4 – Структура і принцип роботи кабельного рефлектометра та формування відбитих імпульсів

Кабельний рефлектометр безпосередньо не вимірює частотні характеристики фідера, проте дозволяє визначити низку важливих параметрів, пов'язаних зі станом лінії та її просторовою однорідністю. Основним вимірюваним параметром є **відстань до неоднорідності**, що дає змогу локалізувати дефекти без демонтажу кабелю.

За формою та амплітудою відбитого сигналу можна оцінити **характер зміни хвильового опору**. Різке зростання амплітуди відбиття свідчить про обрив, тоді як відбиття з протилежною полярністю характерне для короткого замикання. Плавні зміни сигналу зазвичай відповідають поступовим змінам геометрії кабелю або старінню ізоляції (рис. 4.5).

Крім того, TDR дозволяє визначати **електричну довжину фідерної лінії**, оцінювати якість з'єднань і роз'ємів, а також виявляти ділянки з підвищеними втратами. У деяких приладах реалізована можливість оцінки локального хвильового опору вздовж лінії, що є корисним для аналізу складних фідерних трактів.

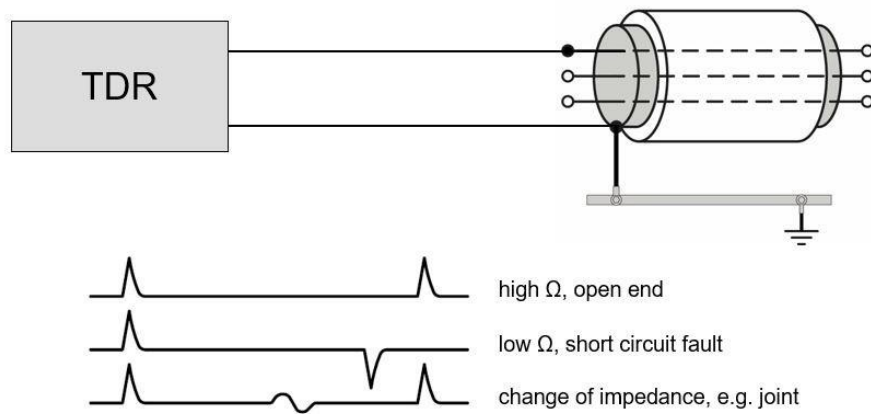


Рисунок 4.5 – Типові види відбиттів для обриву, короткого замикання та неузгодженого навантаження.

Результатом вимірювання за допомогою TDR є **рефлектограма** – графік залежності відбитого сигналу від часу або відстані вздовж фідера. Аналіз рефлектограм є ключовим етапом діагностики антенно-фідерних трактів.

На рисунку 4.5 наведені типові форми відбитого сигналу від характеру навантаження:

- при розімкненому кінці лінії (великий опір, $\text{high } \Omega$) відбитий імпульс має додатну полярність, оскільки хвильовий опір різко зростає;
- при короткому замиканні (малий опір, $\text{low } \Omega$) відбитий імпульс має від’ємну полярність, що відповідає зменшенню хвильового опору;
- при частковій зміні хвильового опору (наприклад, у місці з’єднання або дефектного роз’єму) форма відбиття має меншу амплітуду і складніший вигляд.

Часова затримка між падаючим і відбитим імпульсами визначає відстань до дефекту, а форма та полярність відбиття дозволяють зробити висновок про тип неоднорідності у фідерній лінії.

Початкова ділянка рефлектограми відповідає зоні підключення приладу та роз’єму. Подальші зміни сигналу відображають наявність неоднорідностей уздовж лінії. Відбиття з додатною полярністю зазвичай означає збільшення хвильового опору, тоді як відбиття з від’ємною полярністю вказує на його зменшення. Величина відбиття пов’язана зі ступенем неузгодження і може бути використана для якісної оцінки серйозності дефекту.

Важливо враховувати, що амплітуда відбитого сигналу зменшується зі збільшенням відстані через втрати у кабелі. Тому при інтерпретації рефлектограм необхідно відрізняти реальні дефекти від ефектів загасання. Також слід зважати на можливі множинні відбиття, які можуть виникати між двома неоднорідностями і ускладнювати аналіз.

Таким чином, кабельний рефлектометр є ефективним інструментом первинної діагностики фідерних ліній, що дозволяє швидко оцінити їхній стан, локалізувати дефекти та прийняти рішення щодо подальших вимірювань або ремонтних робіт.

4.3 Аналізатор антен у вимірюваннях антенно-фідерних трактів

Аналізатор антен є спеціалізованим вимірювальним приладом, призначеним для контролю електричних характеристик антенно-фідерних трактів у частотній області (рис. 4.6). На відміну від кабельного рефлектометра, який працює в часовій області та орієнтований на локалізацію дефектів, аналізатор антен використовується насамперед для оцінки **узгодження антени з фідером** і визначення її робочих частотних характеристик.

Ключовою особливістю аналізатора антен є те, що він виконує вимірювання без застосування потужного передавача, використовуючи власне джерело сигналу малої потужності. Це робить його зручним і безпечним інструментом для налаштування та діагностики антен у польових і лабораторних умовах.



Рисунок 4.6 – Аналізатор антени, що вимірює КСХ та комплексний імпеданс навантаження

Основне призначення аналізатора антен полягає у вимірюванні параметрів, що характеризують ступінь узгодження між фідерною лінією та антеною в заданому діапазоні частот. Прилад формує синусоїдальний радіочастотний сигнал з низьким рівнем потужності та подає його на вхід антенно-фідерного тракту. Частина цього сигналу поглинається навантаженням, а частина – відбивається у разі неузгодження.

Аналізатор реєструє відбиту складову сигналу та, порівнюючи її з падаючою хвилею, визначає електричні параметри навантаження. Вимірювання виконуються у

процесі **частотного сканування**, що дозволяє простежити зміну параметрів антени в усьому робочому діапазоні.

Таким чином, аналізатор антен фактично реалізує частотний метод контролю узгодження, подібний за фізичним змістом до вимірювань коефіцієнта відбиття, але у спрощеній формі, достатній для експлуатаційних і налагоджувальних задач.

Одним з основних параметрів, що вимірюється аналізатором антен, є **вхідний імпеданс антенно-фідерного тракту**. Імпеданс є комплексною величиною та характеризує як активну, так і реактивну складові навантаження. Аналіз його зміни з частотою дозволяє визначити резонансні режими роботи антени.

На практиці найбільш поширеним показником якості узгодження є **коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХ, VSWR)**. Він наочно відображає ступінь відбиття енергії та широко використовується як експлуатаційний критерій. Мінімум КСХ зазвичай відповідає резонансній частоті антени.

Крім того, аналізатор антен дозволяє визначати **коефіцієнт відбиття**, а також частотну смугу, в межах якої забезпечується прийнятний рівень узгодження. У деяких моделях додатково відображаються графіки активної та реактивної складових імпедансу, що спрощує аналіз причин неузгодження.

Отже, аналізатор антен забезпечує комплексну оцінку частотних властивостей антенно-фідерного тракту без необхідності використання складних вимірювальних комплексів.

У практиці експлуатації радіотехнічних систем аналізатор антен застосовується насамперед для **налаштування та перевірки антен** перед введенням в експлуатацію. За допомогою приладу визначають резонансну частоту, оцінюють ширину робочої смуги та перевіряють відповідність параметрів антени заданому частотному діапазону.

Аналізатор антен також широко використовується для **діагностики антенно-фідерних трактів**, зокрема для виявлення розузгодження, спричиненого пошкодженням кабелю, корозією роз'ємів або зміною умов встановлення антени. У таких випадках зростання КСХ або зміщення резонансної частоти є інформативними ознаками несправності.

Важливою перевагою аналізатора антен є можливість виконання вимірювань **без підключення передавача**, що дозволяє проводити налаштування у безпечному режимі та без створення радіоперешкод. Саме тому цей прилад часто використовується як первинний засіб контролю антенно-фідерних трактів у польових умовах.

4.4 Вимірювання радіочастотної потужності

Радіочастотна потужність є одним із базових енергетичних параметрів антенно-фідерних трактів, оскільки вона безпосередньо визначає ефективність передачі сигналу та безпечні режими роботи радіопередавального обладнання. На відміну від параметрів узгодження, які характеризують відбиття та втрати, вимірювання потужності дозволяє оцінити, **яка частина енергії реально передається до навантаження**.

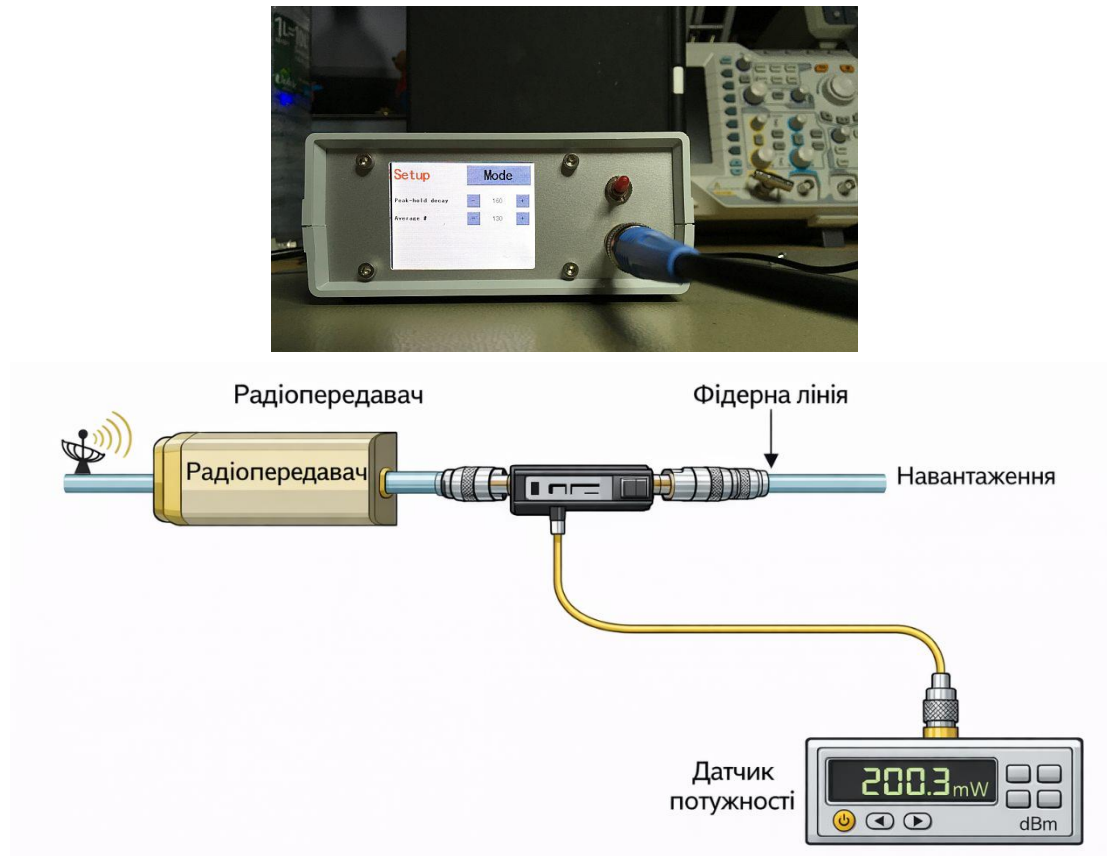


Рисунок 4.7 – Структурна схема і вигляд вимірювача потужності

Особливістю вимірювань у радіочастотному діапазоні є те, що потужність не може бути визначена безпосереднім вимірюванням напруги та струму, як у низькочастотних колах. Це зумовлено високими частотами, розподіленим характером параметрів фідерної лінії та впливом відбиттів. Тому на практиці застосовуються **спеціалізовані вимірювачі потужності** та датчики, що перетворюють ВЧ-енергію у зручний для обробки сигнал.

Під радіочастотною потужністю розуміють швидкість передачі електромагнітної енергії у фідерній лінії або навантаженні. Залежно від режиму роботи розрізняють **падаючу потужність, відбиту потужність та корисну (передану) потужність**, яка поглинається навантаженням.

У системах з неідеальним узгодженням частина потужності відбивається від навантаження та повертається у напрямку джерела. Саме тому вимірювання лише загальної потужності без урахування відбитої складової не дає повної інформації про енергетичний режим антенно-фідерного тракту.

На практиці потужність часто виражають у логарифмічній шкалі – в децибел-міліватах (dBm), що зручно для аналізу широкого діапазону значень і втрат у тракті.

Середня радіочастотна потужність у навантаженні визначається співвідношенням:

$$P = \frac{U_{\text{еф}}^2}{R}, \quad (4.2)$$

де $U_{\text{еф}}$ – ефективне значення напруги, R – активна складова опору навантаження.

У реальних ВЧ-вимірюваннях ця формула використовується переважно для теоретичного аналізу, оскільки безпосереднє вимірювання напруги є складним.

Зв'язок між падаючою, відбитою та переданою потужністю у фідерній лінії можна подати у вигляді:

$$P_{\text{перед}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{відб}}. \quad (4.3)$$

Це співвідношення лежить в основі методів оцінки втрат та контролю узгодження за потужністю.

На рисунку 4.8 наведено часові діаграми напруги у фідерній лінії, які ілюструють взаємозв'язок між падаючою, відбитою та переданою потужністю за умов неузгодженого навантаження. Початковий імпульс, сформований джерелом і узгоджений з хвильовим опором лінії, створює падаючу хвилю, що поширюється у напрямку навантаження. У момент досягнення навантаження з опором, відмінним від хвильового, частина енергії сигналу відбивається, що проявляється у вигляді зміни амплітуди та полярності напруги.

Подальші відбиття між джерелом і навантаженням призводять до формування перехідного процесу, під час якого відбувається перерозподіл енергії у фідерній лінії. Усталений рівень напруги, який спостерігається після завершення перехідного процесу, відповідає переданій потужності, що поглинається навантаженням. Таким чином, рисунок наочно демонструє, що величини падаючої, відбитої та переданої потужності визначаються ступенем узгодження антенно-фідерного тракту та безпосередньо пов'язані з формою часових діаграм сигналу.

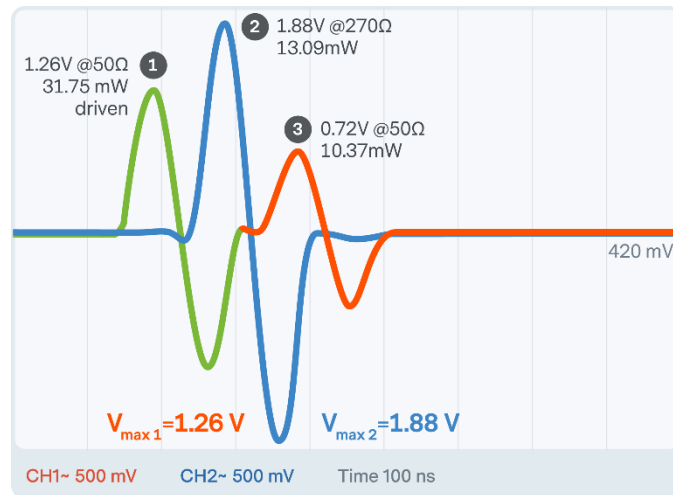


Рисунок 4.8 – Перерозподіл падаючої, відбитої та переданої потужності при неузгодженому навантаженні

Вимірювання ВЧ-потужності здійснюється за допомогою **вимірювача потужності та датчика**, який поглинає або відбирає частину енергії сигналу. Залежно від фізичного принципу роботи застосовуються діодні, термісторні або теплові датчики, які перетворюють радіочастотну енергію у постійний електричний сигнал.

У задачах аналізу антенно-фідерних трактів часто використовується схема вимірювання з **спрямованим відгалужувачем**, яка дозволяє окремо вимірювати падаючу та відбиту потужність. Це особливо важливо для оцінки навантаження передавача та контролю допустимих режимів роботи.

Вимірювання радіочастотної потужності застосовується для контролю вихідної потужності передавачів, оцінки втрат у фідерних лініях та перевірки ефективності узгодження антени. Зростання відбитої потужності часто свідчить про несправності в антенно-фідерному тракті або зміну умов його роботи.

Крім того, контроль потужності є критично важливим з точки зору **захисту передавача**, оскільки надмірні відбиття можуть призводити до перевантаження вихідних каскадів. У поєднанні з аналізатором антен і TDR вимірювач потужності забезпечує завершальний етап комплексної діагностики антенно-фідерних трактів.

Отже, **комплексна діагностика антенно-фідерних трактів** базується на послідовному застосуванні спеціалізованих вимірювальних приладів, кожен з яких забезпечує контроль окремої групи параметрів. На початковому етапі за допомогою кабельного рефлектометра виконують локалізацію дефектів і перевірку однорідності фідерної лінії. Далі аналізатор антен використовують для оцінки узгодження та частотних характеристик антени і фідера. Завершальним етапом є вимірювання радіочастотної потужності, що дозволяє перевірити енергетичний режим роботи тракту та оцінити ефективність передавання сигналу в реальних умовах експлуатації.

Тема 5. Векторні аналізатори мереж (VNA)

Сфери застосування VNA в телекомунікаціях. Узагальнена структура та принцип роботи VNA. Ключові технічні характеристики VNA. Фізичний зміст та інтерпретація S-параметрів. Методи калібрування VNA.

5.1 Сфери застосування векторних аналізаторів мереж у телекомунікаціях

Історично потреба у спеціалізованих засобах аналізу електричних мереж виникла задовго до появи сучасних цифрових і бездротових технологій. У першій половині XX століття, з розвитком радіозв'язку, радіолокації та високочастотної електроніки, стало очевидно, що класичні методи вимірювання напруги та струму є малопридатними у ВЧ- та НВЧ-діапазонах. На високих частотах довжина хвилі стає порівнянною з геометричними розмірами елементів кола, а розподілений характер параметрів призводить до появи відбиттів, стоячих хвиль і фазових зсувів, які неможливо коректно описати методами низькочастотної теорії кіл. Подальший розвиток напівпровідникових технологій, цифрової обробки сигналів і обчислювальної техніки призвів до створення векторних аналізаторів мереж. Саме завдяки їх можливості точно вимірювати параметри антен, фільтрів, підсилювачів, кабельних ліній і узгоджувальних пристроїв стало можливим створення ефективних радіосистем з прогнозованими характеристиками. Мобільний зв'язок, бездротові локальні мережі, високошвидкісні оптоволоконні та мідні інтерфейси базуються на компонентах, параметри яких перевіряються і оптимізуються за допомогою VNA на етапах проєктування, виробництва та експлуатації (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Векторний аналізатор мереж

У процесі розробки антен VNA застосовується для оцінювання ефективності узгодження антени з лінією живлення. Вимірювання коефіцієнта відбиття або втрат на відбиття дає змогу визначити, яка частина енергії передається в простір, а яка повертається назад до джерела. Аналогічний підхід використовується при дослідженні фільтрів, де за допомогою вимірювань коефіцієнтів передачі та відбиття аналізується ширина смуги пропускання, рівень загасання в смузі затримання та

фазові спотворення. Для підсилювачів VNA дозволяє визначати коефіцієнт підсилення, узгодження на вході та виході, а також поведінку пристрою в робочому частотному діапазоні.

На виробничому етапі векторні аналізатори мереж виконують функцію інструмента контролю якості. Типовими завданнями є перевірка характеристик фільтрів, кабельних збірок, ВЧ-модулів та антенних елементів. На етапі експлуатації та технічної діагностики VNA застосовується для пошуку несправностей і оцінювання деградації параметрів телекомунікаційних систем. Кабельні траси, роз'єми, антени та ВЧ-модулі з часом можуть змінювати свої характеристики внаслідок механічних пошкоджень, корозії, температурних впливів або старіння матеріалів. Векторний аналізатор мереж дозволяє визначити наявність неузгоджень, локалізувати дефекти та оцінити їх вплив на загальну роботу системи. У поєднанні з аналізом у часовій області це дає змогу виявляти місця відбиттів і розривів у кабельних лініях без їх демонтажу.

5.2 Узагальнена структура та принцип роботи векторного аналізатора мереж

Векторний аналізатор мереж є вимірювальним приладом замкнутого типу, який поєднує в одному корпусі джерело тестового сигналу та систему вимірювальних приймачів. Така архітектура принципово відрізняє VNA від більшості інших радіочастотних вимірювальних приладів і забезпечує високу точність визначення параметрів електричних мереж у широкому частотному діапазоні. Основною ідеєю роботи VNA є подавання на об'єкт вимірювання відомого за параметрами сигналу та точне вимірювання змін цього сигналу, що виникають у результаті взаємодії з досліджуваною мережею.

Джерело тестового сигналу формує стабільний гармонічний сигнал із заданою частотою та рівнем потужності. У більшості сучасних VNA цей сигнал може перебирати частотний діапазон у режимі частотного сканування, що дозволяє досліджувати поведінку пристрою в усьому робочому спектрі. Важливою особливістю є те, що параметри тестового сигналу точно відомі та контролюються приладом, що створює опорну основу для подальших вимірювань. Саме наявність внутрішнього джерела сигналу дозволяє реалізувати відносні, або нормовані, вимірювання, які значно зменшують вплив зовнішніх факторів.

Об'єкт вимірювання у термінах VNA позначається як **DUT** (Device Under Test) (рис. 5.2). Під цим поняттям розуміють будь-який електричний або радіочастотний пристрій чи мережу, параметри яких необхідно визначити. DUT підключається до

портів аналізатора безпосередньо або через вимірювальні кабелі та перехідники. **Порти VNA** є фізичними точками, через які в DUT вводиться тестовий сигнал і з яких знімається інформація про відбиті та передані хвилі. Кількість портів визначає клас аналізатора і безпосередньо пов'язана з типами вимірювань, які він може виконувати.

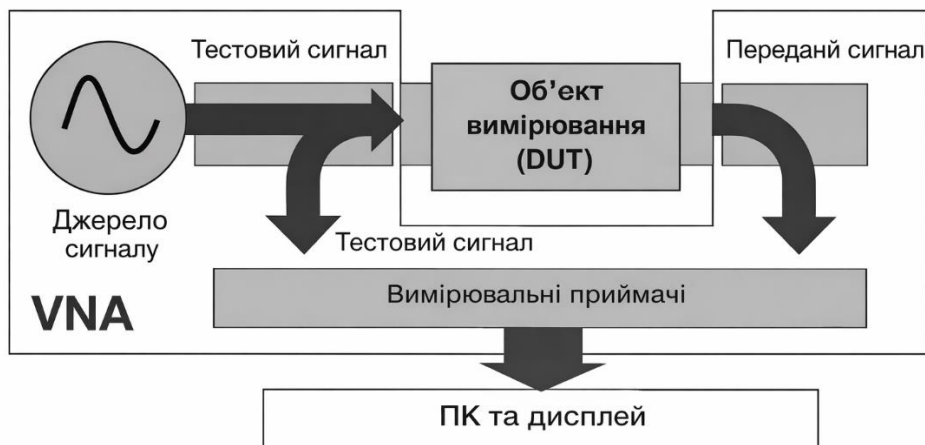


Рисунок 5.2 – Структура та принцип роботи ВНА

Після подавання тестового сигналу на вхід DUT частина енергії відбивається назад до джерела, а частина проходить через пристрій до інших портів. Відбиті та передані сигнали несуть інформацію про узгодження, втрати, підсилення та фазові властивості досліджуваної мережі. Усередині VNA за допомогою напрямних відгалужувачів ці сигнали відокремлюються від падаючої хвилі та спрямовуються до вимірювальних приймачів. Кожен приймач порівнює виміряний сигнал з опорним сигналом від джерела, що дозволяє визначити не лише амплітуду, але й фазу сигналу.

Важливою особливістю VNA є те, що вимірювання виконуються у **векторній формі**, тобто з урахуванням як модуля, так і фазового зсуву. Це дає змогу повністю охарактеризувати поведінку електричної мережі у частотній області та перейти до опису її властивостей за допомогою параметрів розсіювання. Усі результати вимірювань обробляються внутрішніми обчислювальними модулями приладу або зовнішнім комп'ютером і відображаються у зручній для аналізу формі.

За кількістю портів розрізняють **однопортові, двопортові та багатопортові** векторні аналізатори мереж. Однопортові VNA призначені для вимірювання лише відбитих сигналів і застосовуються переважно для оцінювання узгодження, наприклад при аналізі антен або навантажень. Двопортові аналізатори є найбільш поширеними і дозволяють вимірювати як відбиття, так і передачу сигналу в прямому та зворотному напрямках. Саме такі прилади найчастіше використовуються для дослідження фільтрів, підсилювачів, мікшерів і кабельних трактів.

Багатоповерхові VNA застосовуються у випадках, коли необхідно аналізувати складні пристрої з кількома входами та виходами, наприклад багатоканальні підсилювачі, диференціальні ВЧ-модулі або антенно-фідерні системи зі складною структурою. Зі збільшенням кількості портів зростає обсяг вимірювань і складність оброблення результатів, проте принцип роботи приладу залишається незмінним: подавання відомого тестового сигналу, вимірювання відбитих і переданих хвиль та їх векторний аналіз.

У телекомунікаційних вимірюваннях векторний аналізатор мереж і спектральний аналізатор належать до базових інструментів, однак вони реалізують принципово різні підходи до отримання інформації про досліджувані сигнали та пристрої. Розуміння цієї різниці є важливим для коректного вибору вимірювального засобу залежно від поставленого завдання.

Ключова відмінність між цими приладами полягає у характері сигналу, з яким вони працюють. Векторний аналізатор мереж виконує вимірювання на основі **відомого тестового сигналу**, який формується власним внутрішнім джерелом. Параметри цього сигналу – частота, рівень потужності, фаза – точно задаються та контролюються приладом. Після подавання сигналу на об'єкт вимірювання VNA аналізує, яким чином цей сигнал змінюється внаслідок взаємодії з електричною мережею. Таким чином, VNA не вимірює сам сигнал як такий, а визначає **властивості мережі**, через яку цей сигнал проходить або від якої відбивається.

Спектральний аналізатор, навпаки, орієнтований на **аналіз невідомих сигналів**, що надходять на його вхід. Він вимірює розподіл потужності сигналу за частотою та відображає спектральний склад – наявні гармоніки, побічні випромінювання, рівні шуму. У цьому випадку прилад не має інформації про джерело сигналу та не контролює його параметри. Спектральний аналізатор є інструментом спостереження, а не збудження, і саме тому він широко застосовується для аналізу модуляції, контролю спектральної маски, пошуку завад і оцінювання якості передаваних сигналів.

Принципова різниця між цими підходами безпосередньо впливає на типи задач, які можуть бути розв'язані за допомогою кожного приладу. Векторний аналізатор мереж забезпечує вимірювання як амплітудних, так і фазових характеристик, що дозволяє повністю охарактеризувати електричну мережу у частотній області. Саме векторна інформація робить можливим визначення параметрів узгодження, втрат, підсилення, фазових зсувів і групових затримок. Спектральний аналізатор, у типовій конфігурації, не надає фазової інформації і тому не дозволяє виконувати повну параметричну ідентифікацію мережі.

5.3 Ключові технічні характеристики векторного аналізатора мереж та їх вплив на результати вимірювань

Ефективність застосування векторного аналізатора мереж у телекомунікаційних вимірюваннях визначається сукупністю його технічних характеристик. До таких характеристик належать діапазон частот, динамічний діапазон, рівень шуму траси та швидкодія вимірювань.

Діапазон частот є основною характеристикою будь-якого VNA. Він задає область частот, у межах якої прилад здатний формувати тестовий сигнал і виконувати коректні вимірювання відбитих та переданих хвиль. Під час вибору або використання VNA необхідно враховувати не лише номінальний робочий діапазон пристрою, що досліджується, але й можливі гармонічні складові сигналів

Динамічний діапазон VNA визначає максимальний інтервал ослаблень або підсилень сигналу, який може бути надійно виміряний приладом у заданому частотному діапазоні. З фізичної точки зору цей параметр характеризує різницю між найбільшим рівнем сигналу, який може бути виміряний без спотворень, і найменшим рівнем, який ще відрізняється від шуму вимірювальної системи. Якщо динамічний діапазон VNA є недостатнім, результати вимірювань у зонах сильного загасання стають неточними або взагалі непридатними для інтерпретації.

Шум траси є характеристикою, що описує випадкові флуктуації вимірюваного сигналу, які накладаються на корисний результат. Він зазвичай виражається у дуже малих одиницях рівня сигналу та визначає мінімальні зміни параметрів DUT, які можуть бути достовірно зафіксовані. Високий рівень шуму траси обмежує точність таких вимірювань і може призводити до хибних висновків щодо відповідності пристрою технічним вимогам.

Швидкодія вимірювань визначає час, необхідний для виконання одного повного циклу вимірювання, наприклад частотного сканування. При цьому часто виникає компроміс між швидкістю та точністю, оскільки підвищення швидкості вимірювань може супроводжуватися зростанням рівня шуму або зменшенням динамічного діапазону.

5.4 Фізичний зміст та інтерпретація S-параметрів

У високочастотній техніці традиційні параметри електричних кіл, такі як напруга і струм, втрачають наочність і практичну зручність для вимірювань. Це пов'язано з тим, що на ВЧ- і НВЧ-частотах електрична енергія поширюється у вигляді

електромагнітних хвиль, а самі елементи кола мають розподілений характер параметрів. У таких умовах більш природним є опис мережі через хвильові процеси, тобто через взаємодію падаючих і відбитих хвиль на її портах. Саме на цьому підході ґрунтується поняття параметрів розсіювання, або S-параметрів.

Розглянемо електричну мережу як об'єкт із певною кількістю портів, кожен з яких підключений до лінії передачі з відомим хвильовим опором. На кожному порту можна виділити дві складові хвильового процесу: падаючу хвилю, яка надходить у мережу з боку джерела, і відбиту хвилю, яка повертається назад у лінію внаслідок неузгодження або внутрішніх властивостей мережі. Падаючі хвилі зазвичай позначаються символами a_n , а відбиті – b_n , де індекс n відповідає номеру порту. Обидві величини є комплексними і описуються не лише амплітудою, але й фазою.

S-параметри визначаються як відношення комплексних амплітуд відбитих або переданих хвиль до амплітуди падаючої хвилі за умови, що всі інші порти навантажені узгодженими навантаженнями. Такий підхід дозволяє ізолювати вплив одного збудження та однозначно інтерпретувати результати вимірювань. Фізично S-параметри характеризують, яка частина енергії відбивається від порту або передається через мережу, а також який фазовий зсув при цьому виникає.

Для двопортового пристрою, що є типовим об'єктом вимірювань у телекомунікаціях, вводяться чотири основні S-параметри (рис. 5.3). Параметр **S11** відповідає коефіцієнту відбиття на першому порту. Він показує, яка частина падаючої на вхід пристрою хвилі відбивається назад у джерело. З фізичної точки зору S11 є кількісною мірою узгодження входу пристрою з лінією передачі. Малий за модулем S11 свідчить про хороше узгодження, що є критично важливим, наприклад, для антен і підсилювачів.

Параметр **S21** характеризує коефіцієнт передачі сигналу з першого порту на другий у прямому напрямку. Він відображає, яка частина енергії падаючої хвилі на вході проходить через пристрій і з'являється на виході. Для пасивних пристроїв, таких як фільтри або кабельні лінії, S21 зазвичай характеризує втрати на проходження сигналу, тоді як для активних пристроїв – коефіцієнт підсилення. Фазова складова S21 дозволяє оцінювати фазові спотворення та часові затримки сигналу.

Параметр **S22** є аналогом S11, але для другого порту. Він описує коефіцієнт відбиття на виході пристрою за умови, що сигнал надходить з цього боку. Значення S22 є важливим для аналізу узгодження вихідних каскадів підсилювачів, фільтрів або інших ВЧ-модулів, особливо в системах з двонапрямним передаванням сигналів.

Параметр **S12** відповідає коефіцієнту передачі у зворотному напрямку, тобто з другого порту на перший. У багатьох телекомунікаційних пристроях, зокрема в підсилювачах і дуплексерах, цей параметр використовується для оцінювання

зворотної ізоляції. Малий за модулем S12 свідчить про хороше розділення напрямків передачі сигналу, що є важливим для стабільності роботи та зменшення паразитних зворотних зв'язків.

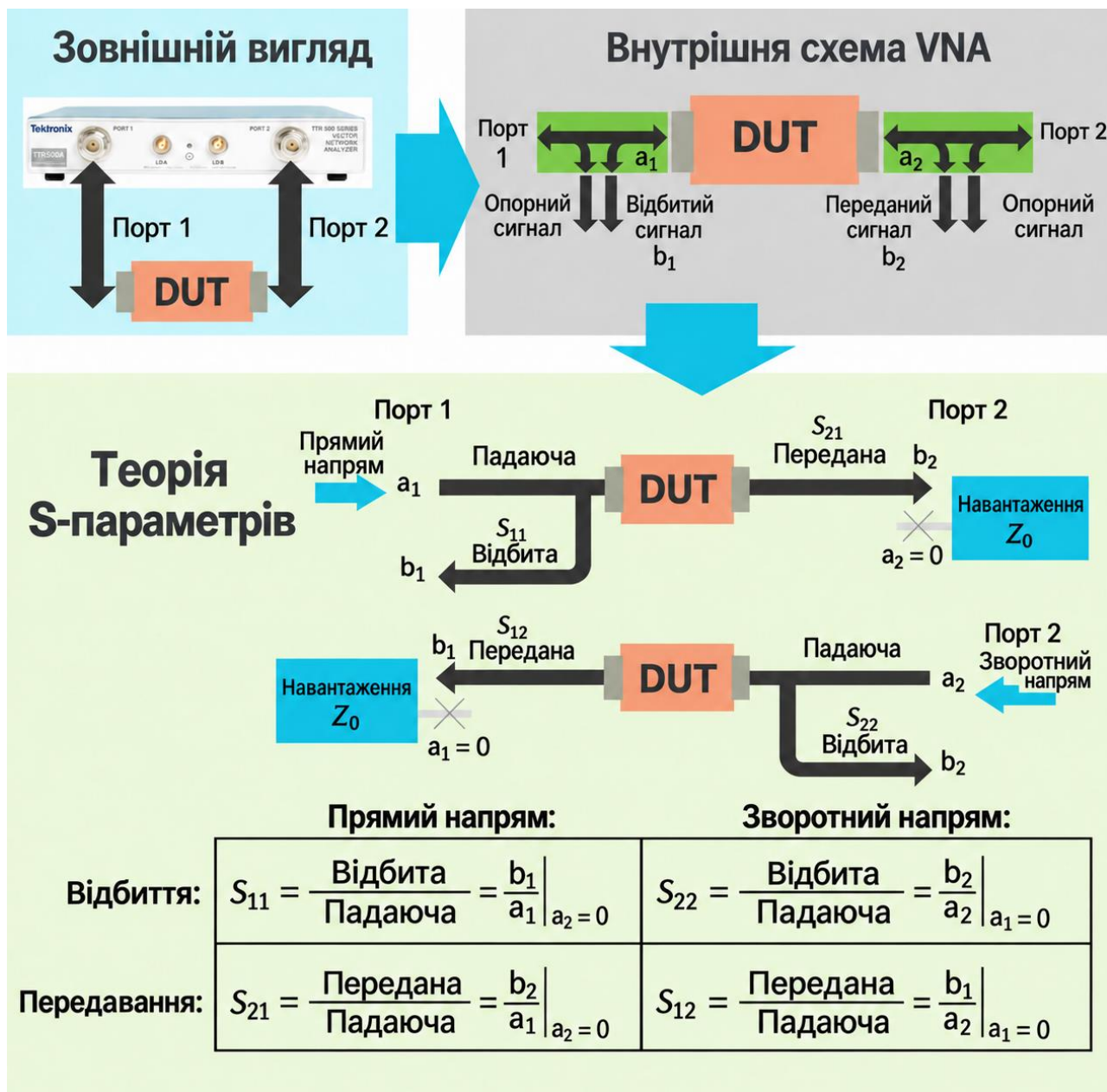


Рисунок 5.3 – Пояснення S-параметрів

Кожен S-параметр є комплексною величиною, тому його інтерпретація включає аналіз як модуля, так і фази. Модуль S-параметра визначає відносний рівень відбитої або переданої енергії, тоді як фазова складова несе інформацію про часові затримки та фазові спотворення, які виникають у мережі. Саме поєднання цих двох складових робить S-параметри універсальним інструментом опису електричних мереж у частотній області.

Таким чином, S-параметри забезпечують фізично наочний і водночас формально строгий опис поведінки двопортових і багатопортових телекомунікаційних

пристроїв. Вони дозволяють безпосередньо пов'язати результати вимірювань із характеристиками узгодження, втрат, підсилення та фазових властивостей, що робить їх базовим інструментом аналізу при роботі з векторними аналізаторами мереж.

5.5 Похибки вимірювань у ВЧ- та НВЧ-діапазоні

Вимірювання у ВЧ- та НВЧ-діапазонах принципово відрізняються від низькочастотних вимірювань як за фізичною природою процесів, так і за чутливістю до різноманітних джерел похибок. На високих частотах електромагнітні хвилі поширюються вздовж ліній передачі, а будь-яка неоднорідність, неузгодження або нестабільність параметрів призводить до появи відбиттів, фазових зсувів і спотворень результатів вимірювань. Саме тому аналіз похибок є необхідним етапом перед вивченням процедур калібрування векторного аналізатора мереж.

У загальному випадку похибки VNA-вимірювань поділяють на систематичні, випадкові та дрейфові. Такий поділ є зручним з методичної точки зору, оскільки дозволяє чітко відокремити похибки, які можуть бути усунуті або зменшені за допомогою калібрування, від тих, що мають стохастичний або часово-залежний характер.

Систематичні похибки виникають унаслідок недосконалості вимірювального тракту та тестового середовища. До їх фізичних причин належать нерівномірність амплітудно-частотної характеристики приймачів VNA, нестабільність рівня тестового сигналу, втрати у вимірювальних кабелях, перехідниках і роз'ємах, а також обмежена спрямованість напрямних відгалужувачів. У ВЧ- та НВЧ-діапазонах навіть короткі відрізки кабелю або неякісні роз'єми можуть вносити значні фазові зсуви та додаткові втрати, які безпосередньо впливають на виміряні S-параметри. Характерною особливістю систематичних похибок є їх відтворюваність: за незмінних умов вимірювання вони повторюються від вимірювання до вимірювання. Саме ця властивість робить можливим їх ефективне зменшення за допомогою користувацького калібрування VNA.

Випадкові похибки мають іншу фізичну природу і пов'язані з шумовими процесами у вимірювальній системі. Основними джерелами таких похибок є тепловий шум електронних компонентів, фазові шуми генератора тестового сигналу та внутрішні шуми приймачів аналізатора мереж. На відміну від систематичних, випадкові похибки змінюються з часом і не можуть бути повністю усунуті калібруванням. Вони проявляються у вигляді флуктуацій вимірюваних кривих, зокрема нерівностей амплітудно-частотних характеристик або нестабільності

фазових даних. Рівень випадкових похибок визначає граничну точність вимірювань і мінімальні зміни параметрів DUT, які можуть бути достовірно зафіксовані.

Дрейфові похибки пов'язані зі змінами параметрів вимірювальної системи та тестового середовища з часом. Їх фізичними причинами є температурні коливання, зміни вологості, механічні напруження та старіння елементів вимірювального тракту. У ВЧ- та НВЧ-діапазонах навіть незначні температурні зміни можуть призводити до помітних фазових зсувів у кабелях і внутрішніх трактах VNA. Дрейфові похибки не проявляються миттєво, але поступово накопичуються після виконання калібрування, що знижує достовірність результатів вимірювань. Саме вони визначають, як часто необхідно повторювати процедуру калібрування під час тривалих вимірювальних сесій або у виробничих умовах.

Вплив різних типів похибок на результати вимірювань є комплексним. Систематичні похибки можуть призводити до сталих зсувів рівнів S-параметрів, що спотворює уявлення про реальні втрати або узгодження пристрою. Випадкові похибки обмежують роздільну здатність вимірювань і ускладнюють аналіз тонких ефектів, таких як невеликі нерівності у смузі пропускання фільтрів. Дрейфові похибки, своєю чергою, створюють ризик отримання різних результатів для одного й того самого DUT у різні моменти часу.

5.6 Заводське та користувацьке калібрування векторного аналізатора мереж

Точність вимірювань у векторному аналізаторі мереж безпосередньо залежить від коректності його калібрування. На відміну від багатьох інших радіочастотних вимірювальних приладів, VNA використовує дворівневий підхід до калібрування, який включає заводське калібрування та користувацьке калібрування. Розуміння відмінностей між цими двома процедурами є принципово важливим для правильного трактування результатів вимірювань і оцінювання реальних параметрів досліджуваного пристрою.

Заводське калібрування виконується виробником і спрямоване на забезпечення відповідності приладу заявленим метрологічним характеристикам. У межах цієї процедури перевіряється робота внутрішнього джерела тестового сигналу, стабільність його рівня та частоти, а також точність вимірювальних приймачів у заданому частотному діапазоні. Заводське калібрування визначає базову точність приладу та гарантує, що всі вимірювальні канали функціонують у межах специфікацій. Результати такого калібрування зазвичай є дійсними протягом тривалого часу і підтверджуються відповідними калібрувальними сертифікатами.

Водночас заводське калібрування не враховує впливу зовнішніх елементів, які використовуються під час реальних вимірювань. До таких елементів належать вимірювальні кабелі, перехідники, роз'єми, фікстури та інші допоміжні засоби, що з'єднують VNA з об'єктом вимірювання. У ВЧ- та НВЧ-діапазонах навіть незначні втрати або фазові зсуви, внесені цими компонентами, можуть суттєво спотворювати результати вимірювань. Саме тому векторний аналізатор мереж надає можливість виконання додаткового користувацького калібрування безпосередньо перед проведенням вимірювань.

Користувацьке калібрування полягає у вимірюванні спеціальних еталонних навантажень і подальшому математичному коригуванні результатів з метою усунення систематичних похибок вимірювального тракту. Ключовим поняттям у цьому процесі є **опорна площа вимірювання**. Опорна площа визначає точку в тракті, відносно якої результати вимірювань вважаються достовірними. Після заводського калібрування ця площа, як правило, розташована на вимірювальних роз'ємах самого аналізатора. У процесі користувацького калібрування опорна площа переноситься до кінця вимірювальних кабелів або безпосередньо до точок підключення DUT.

Фізичний зміст перенесення опорної площини полягає у виключенні впливу кабелів, перехідників і фікстур із результатів вимірювань. Після виконання користувацького калібрування всі втрати, відбиття та фазові зсуви, пов'язані з цими елементами, враховуються у корекційних коефіцієнтах і не відображаються у вимірних S-параметрах. У результаті вимірюються саме характеристики DUT, а не сумарні властивості всієї вимірювальної конфігурації.

Користувацьке калібрування векторного аналізатора мереж реалізується різними методами, вибір яких залежить від вимог до точності вимірювань, складності вимірювальної конфігурації та доступних апаратних ресурсів.

Найпростішим з практичної точки зору є **response-калібрування** (рис. 5.4). У цьому випадку вимірюється реакція вимірювального тракту на один або декілька еталонів, після чого результати нормуються відносно цього вимірювання. Такий підхід дозволяє частково компенсувати нерівномірність амплітудно-частотної характеристики тракту, проте не усуває похибки, пов'язані з відбиттями та паразитними зв'язками. Response-калібрування застосовується переважно у навчальних або допоміжних вимірюваннях, коли вимоги до точності є помірними, а швидкість виконання процедури має пріоритет.

Більш точним є **двопортове калібрування з одним напрямком поширення сигналу (2-port one-path)**. У цьому методі аналізатор збуджує DUT лише з одного порту, а калібрування виконується для обмеженого набору S-параметрів, зазвичай

пов'язаних із прямим напрямком передачі. Такий підхід дозволяє досягти вищої точності порівняно з response-калібруванням і зменшити кількість фізичних підключень під час процедури. Водночас цей метод не забезпечує повної корекції для зворотного напрямку передачі та тому має обмежену застосовність у складних вимірювальних задачах.

Найбільш універсальним і точним класичним методом є **повне двопортове калібрування з двома напрямками поширення сигналу (2-port two-path)**. У цьому випадку калібрування виконується окремо для кожного порту і для обох напрямків передачі сигналу. Така процедура дозволяє коректно вимірювати всі чотири S-параметри двопортового DUT і максимально зменшити систематичні похибки вимірювального тракту. Недоліком цього методу є підвищена складність процедури та значна кількість операцій з підключення і заміни еталонів, що збільшує час калібрування і підвищує ймовірність операторських помилок.

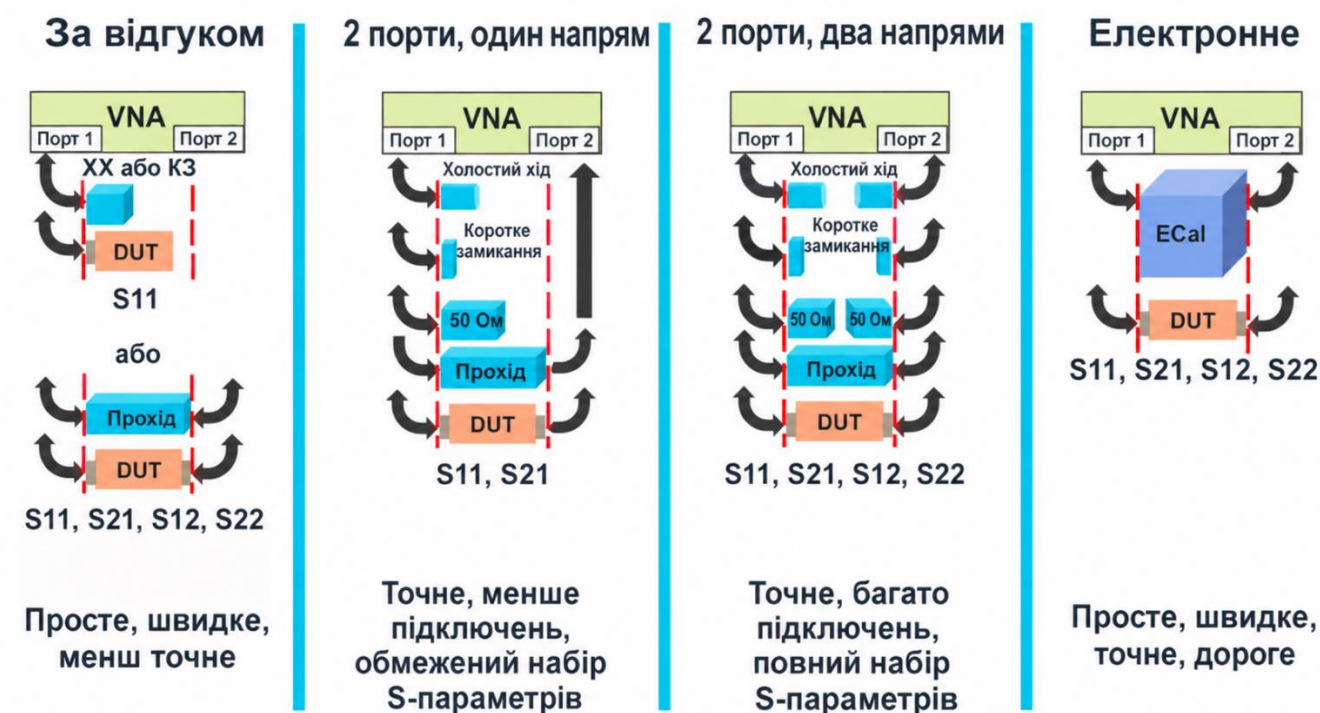


Рисунок 5.4 – Методи користувацького калібрування

Суттєвим кроком у спрощенні процедури калібрування стало **електронне калібрування**. У цьому випадку замість набору окремих механічних еталонів використовується електронний калібрувальний модуль, який містить кілька внутрішніх еталонних станів і керується аналізатором автоматично. Оператору достатньо виконати мінімальну кількість підключень, після чого вся процедура калібрування здійснюється без ручної заміни стандартів. Електронне калібрування

забезпечує високу точність і відтворюваність результатів, проте супроводжується вищою вартістю обладнання.

Усі перелічені методи калібрування базуються на використанні **калібрувальних еталонів**, параметри яких відомі з високою точністю (рис. 5.5). Найпоширенішим набором еталонів є комплект **SOLT (Short, Open, Load, Thru)**. Коротке замикання та розімкнене коло використовуються для формування крайніх умов відбиття, прецизійне навантаження – для реалізації узгодженого стану, а наскрізне з'єднання – для калібрування каналу передачі. Ці еталони дозволяють побудувати математичну модель похибок вимірювального тракту та виконати їх корекцію.

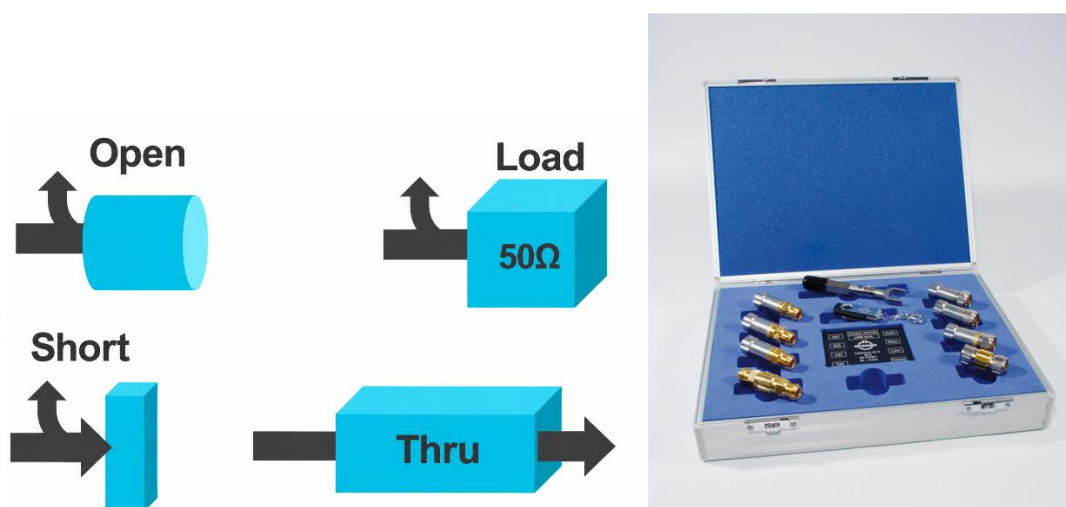


Рисунок 5.5 – Набір калібрувальних еталонів

У практиці вимірювань застосовуються як **окремні механічні еталони**, так і інтегровані калібрувальні набори. Окремі еталони забезпечують високу точність і гнучкість використання, проте потребують уважного поводження та точної ідентифікації кожного стандарту. Інтегровані механічні модулі типу «4-в-1» поєднують усі SOLT-еталони в одному корпусі, що спрощує процедуру калібрування та зменшує ймовірність помилок.

Важливо підкреслити, що жоден калібрувальний еталон не є ідеальним з фізичної точки зору. Реальне коротке замикання має індуктивність, розімкнене коло – паразитну ємність, а навантаження – обмежену точність хвильового опору. Тому векторний аналізатор мереж використовує внутрішні **моделі еталонів**, які враховують ці відхилення у широкому частотному діапазоні. Саме коректність цих моделей значною мірою визначає точність кінцевих результатів вимірювань.

5.7 Режими вимірювань у векторних аналізаторах мереж

Базовими режимами роботи VNA є **вимірювання відбиття та передачі**. У режимі вимірювання відбиття аналізується частина тестового сигналу, яка

повертається назад у напрямку джерела внаслідок неузгодження або внутрішніх властивостей досліджуваного пристрою. Такі вимірювання зазвичай пов'язані з визначенням параметрів S_{11} або S_{22} і широко застосовуються для оцінювання узгодження антен, навантажень, фільтрів і вхідних каскадів активних пристроїв. Режим вимірювання передачі, навпаки, зосереджений на аналізі сигналу, що проходить через DUT і реєструється на іншому порту аналізатора. У цьому випадку основними параметрами є S_{21} і S_{12} , які характеризують втрати, підсилення або ізоляцію між портами.

Найпоширенішою формою реалізації цих режимів є **частотне сканування**. Під час такого вимірювання внутрішнє джерело VNA послідовно перебирає заданий діапазон частот, а на кожній частотній точці вимірюються відповідні S-параметри. Частотне сканування дозволяє отримати повну картину поведінки пристрою у робочій смузі та за її межами. Для телекомунікаційних компонентів це особливо важливо, оскільки багато з них мають виражені частотні залежності, які неможливо коректно оцінити за одиничним вимірюванням.

Однією з типових практичних задач є **аналіз антен**. У цьому випадку VNA використовується переважно в режимі вимірювання відбиття, оскільки основний інтерес становить ефективність узгодження антени з лінією живлення. Частотна залежність коефіцієнта відбиття дозволяє визначити робочу смугу антени, резонансні частоти та оцінити якість випромінювання. Такі вимірювання широко застосовуються як на етапі проєктування, так і під час експлуатаційної перевірки антенних систем.

Не менш важливим є **аналіз фільтрів**, для якого зазвичай використовується режим вимірювання передачі у поєднанні з вимірюванням відбиття. Частотне сканування дозволяє оцінити смугу пропускання фільтра, рівень загасання в смузі затримання та характер переходів між цими зонами. Додатково аналіз фазових характеристик дає змогу оцінити фазові спотворення, які можуть впливати на якість передавання сигналів у телекомунікаційних системах.

Окреме місце серед типових режимів вимірювань займає **оцінка коефіцієнта стоячої хвилі**. Цей параметр є похідним від коефіцієнта відбиття і широко використовується для практичної оцінки узгодження між джерелом і навантаженням. VNA дозволяє визначати коефіцієнт стоячої хвилі у широкому частотному діапазоні, що є зручним для швидкого контролю якості антен, кабельних трактів і ВЧ-модулів. Частотна залежність цього коефіцієнта надає інженеру наочну інформацію про області ефективної та неефективної роботи пристрою.

Окрім базових частотних вимірювань, векторні аналізатори мереж підтримують низку **розширених режимів**, які істотно підвищують їх діагностичні можливості у телекомунікаційних застосуваннях. До таких режимів належать аналіз у часовій

області, вимірювання залежності параметрів від рівня потужності та дослідження багатопортових компонентів. У сукупності ці режими дозволяють переходити від статичного опису частотних характеристик до глибшого розуміння просторових, нелінійних і структурних властивостей складних пристроїв.

Аналіз у **часовій області** реалізується у VNA шляхом математичного перетворення результатів частотних вимірювань. Оскільки вимірювання S-параметрів виконуються у дискретних точках частотного діапазону, отримані дані можуть бути оброблені з використанням оберненого перетворення Фур'є. У результаті частотна залежність відбиттів або передачі сигналу відображається у часовій шкалі, яка безпосередньо пов'язана з відстанню поширення електромагнітної хвилі в лінії передачі.

Фізичний зміст такого переходу полягає в можливості локалізувати місця неоднорідностей у кабельних трактах і з'єднаннях. Кожна невідповідність хвильового опору – перехідник, роз'єм, пошкодження або дефект кабелю – викликає часткове відбиття сигналу. У часовій області ці відбиття проявляються як імпульси, розташовані на різних відстанях від опорної площини вимірювання. Таким чином, VNA може використовуватися не лише як інструмент частотного аналізу, але і як засіб діагностики фізичного стану ліній передачі без їх демонтажу. Просторова роздільна здатність такого аналізу визначається шириною частотного діапазону вимірювань, що підкреслює взаємозв'язок між частотною та часовою областями.

Іншим важливим розширеним режимом є **вимірювання за рівнем потужності**, яке застосовується переважно для аналізу активних компонентів, зокрема підсилювачів. На відміну від частотного сканування, у цьому режимі частота тестового сигналу залишається сталою, а його рівень потужності змінюється у заданих межах. Такий підхід дозволяє дослідити, як змінюються параметри передачі пристрою залежно від рівня збудження.

Особливе значення при цьому має визначення **точки компресії 1 дБ**, яка є одним із ключових показників нелінійності підсилювача. У лінійному режимі роботи вихідна потужність зростає пропорційно до вхідної, і коефіцієнт передачі залишається сталим. Коли ж рівень вхідного сигналу досягає певного порогового значення, підсилювач починає працювати в нелінійному режимі, що проявляється у зменшенні приросту вихідної потужності. Точка компресії 1 дБ визначає межу, за якою відхилення від лінійної характеристики стає помітним і може призводити до спотворень сигналу в телекомунікаційних системах.

Важливим напрямом застосування VNA є **вимірювання багатопортових компонентів**, які дедалі частіше використовуються в сучасних телекомунікаційних пристроях. До таких компонентів належать багатоканальні підсилювачі,

диференціальні ВЧ-модулі, антенні решітки та складні фільтрувальні структури. Для їх коректного аналізу необхідно одночасно враховувати взаємодію між кількома портами, що неможливо реалізувати за допомогою стандартного двопортового аналізатора.

Багатопортові VNA дозволяють формувати тестовий сигнал на будь-якому з портів і вимірювати відбиті та передані сигнали на всіх інших портах. Це призводить до розширення поняття S-параметрів, оскільки для пристрою з N портами необхідно визначити N^2 коефіцієнтів розсіювання. Такий підхід дає змогу повноцінно охарактеризувати взаємний вплив портів, рівень ізоляції між каналами та поведінку пристрою у складних режимах роботи. Хоча процедура калібрування і вимірювань у цьому випадку є більш складною, отримана інформація є незамінною для проєктування та діагностики сучасних телекомунікаційних систем.

Тема 6. Інструментальні вимірювання параметрів радіоканалів та бездротових мереж

Місце інструментальних вимірювань у діагностиці радіоканалів та бездротових мереж. Осцилограф у вимірюваннях радіосигналів. Вимірювання радіочастотної потужності. Аналізатор сигналів (VSA).

6.1 Місце інструментальних вимірювань у діагностиці радіоканалів та бездротових мереж

Радіоканали та бездротові мережі належать до класу систем, у яких передавання інформації здійснюється через фізичне середовище з істотною невизначеністю параметрів. На якість зв'язку впливають шум, завади, нестабільність генераторів, багатопроменеве поширення, відбиття та втрати в трактах передавання. Тому повноцінна діагностика бездротових систем неможлива без інструментальних вимірювань, які дозволяють безпосередньо оцінювати параметри сигналу на фізичному рівні.

Інструментальні вимірювання доповнюють протокольну та логічну діагностику. Якщо протокольні методи дозволяють виявити факт помилки або зниження пропускну здатності, то інструментальні вимірювання відповідають на питання про фізичні причини деградації каналу: нестабільність амплітуди, фазові спотворення, перевищення або недостатність потужності, часові флуктуації сигналу. Саме тому вони є базовими для аналізу, налагодження та експлуатації радіоканалів.

У загальному випадку радіосигнал можна описати як функцію часу:

$$s(t) = A(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi(t)), \quad (6.1)$$

де $A(t)$ – миттєва амплітуда, f_c – несуча частота, $\varphi(t)$ – фаза.

Залежно від типу модуляції інформація передається через зміну амплітуди, частоти або фази. Відповідно, вимірювальні задачі поділяються на часові, енергетичні та векторні.

Часові параметри характеризують форму сигналу у часовій області та включають **амплітуду, період, частоту, тривалість імпульсів, часи наростання і спаду**, а також **джитер**. Енергетичні параметри пов'язані з потужністю сигналу та її розподілом у часі; ключовим параметром є **середня потужність**, яка визначає дальність зв'язку та енергетичний баланс радіоканалу. Для навантаження з опором R середня потужність може бути записана як:

$$P = \frac{1}{T} \int \frac{u^2}{R}(t)dt. \quad (6.2)$$

Векторні параметри використовуються для опису модульованих сигналів і ґрунтуються на поданні сигналу у вигляді квадратурних складових $I(t)$ та $Q(t)$, що дозволяє аналізувати фазові й амплітудні спотворення, а також якість модуляції.

З огляду на це, для діагностики радіоканалів застосовується сукупність спеціалізованих вимірювальних інструментів. **Осцилограф** використовується для аналізу сигналу у часовій області та дає наочне уявлення про форму сигналу, часові флуктуації та шум. **Вимірювач радіочастотної потужності** забезпечує точне визначення енергетичних характеристик сигналу незалежно від його модуляції. **Аналізатор сигналів** (Vector Signal Analyzer, VSA) дозволяє перейти до векторного подання сигналу та безпосередньо оцінювати параметри модуляції, фазові та амплітудні спотворення. Кожен прилад розкриває лише окрему групу параметрів, тому практичні вимірювання, як правило, виконуються комплексно, з урахуванням задач аналізу та експлуатації системи. У подальшому матеріалі лекції розглядаються принципи роботи, вимірювані параметри та методики застосування основних інструментів інструментальної діагностики радіоканалів.

6.2 Осцилограф у вимірюваннях радіосигналів

Першим базовим інструментом інструментальної діагностики радіоканалів є осцилограф (рис.6.1).

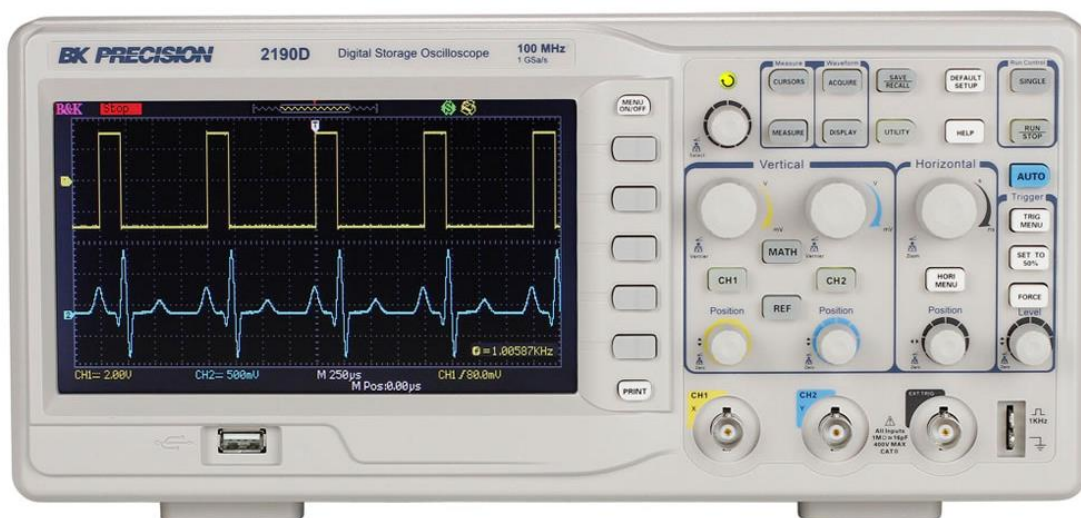


Рисунок 6.1 – Загальний вигляд цифрового осцилографа (органи керування, дисплей)

Саме з нього, як правило, починається аналіз сигналу на фізичному рівні, оскільки осцилограф забезпечує пряме та наочне відображення сигналу у часовій області. Це дозволяє інженеру або досліднику отримати первинне уявлення про форму сигналу, його стабільність та наявність спотворень ще до детального аналізу енергетичних або векторних параметрів.

Осцилограф вимірює миттєве значення напруги сигналу як функцію часу. У контексті радіоканалів це дає змогу оцінити амплітуду сигналу, його періодичність, часову структуру імпульсів, а також наявність шуму та паразитних коливань (рис. 6.2, 6.3). Для гармонічного або квазігармонічного сигналу визначаються пікове та піко-пікове значення напруги, ефективне значення, а також частота, яка пов'язана з періодом співвідношенням $f = 1/T$.

У випадку імпульсних або пакетних сигналів важливими стають параметри тривалості імпульсу, інтервалу між імпульсами та стабільність часових фронтів.

Однією з ключових переваг осцилографа є можливість аналізу швидкоплинних процесів. Час наростання та спаду фронтів дозволяє оцінити смугу пропускання тракту передавання, а також якість формування сигналу передавачем. Наявність випадкових відхилень моментів переходу через пороговий рівень інтерпретується як джитер, який у цифрових бездротових системах безпосередньо впливає на ймовірність помилок синхронізації та декодування.

У практиці діагностики радіоканалів осцилограф часто використовується для контролю сигналів на проміжних етапах тракту: після генератора, підсилювача, модулятора або перетворювача частоти. Це дозволяє локалізувати джерело спотворень ще до проведення складніших вимірювань. Важливо підкреслити, що осцилограф не аналізує інформаційний вміст сигналу, а лише його часову форму. Саме тому він є інструментом первинного аналізу, але не дає повної картини якості модуляції чи спектральних характеристик.

Обмеження осцилографа стають очевидними при роботі з сучасними складномодульованими сигналами. У таких випадках часове подання сигналу не дозволяє безпосередньо оцінити фазові спотворення, відхилення частоти або якість квадратурних компонент. Проте саме на основі осцилографічних вимірювань приймається рішення про подальше застосування спеціалізованих приладів – вимірювача потужності або аналізатора сигналів.



Рисунок 6.2 – Відображення радіосигналу у часовій області на екрані осцилографа

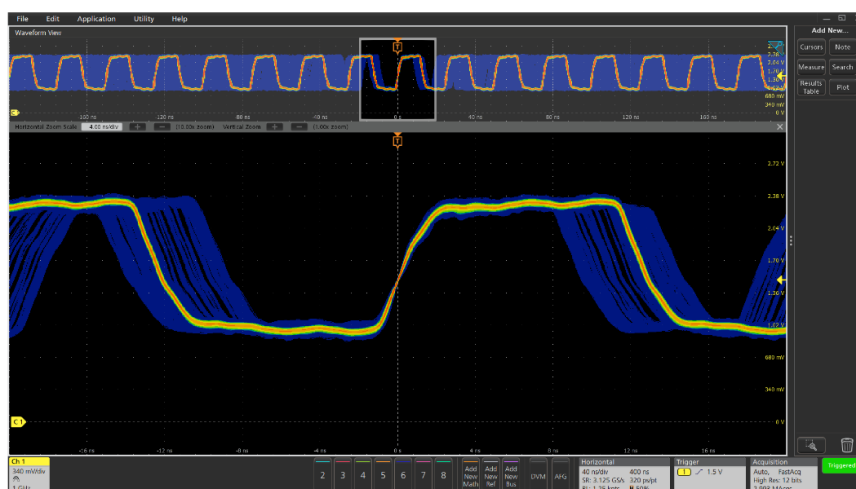


Рисунок 6.3 – Прояв джитера на часовій формі цифрового сигналу

Таким чином, осцилограф виконує роль стартового інструменту в ієрархії інструментальних вимірювань радіоканалів. Він забезпечує швидкий і наочний контроль часових параметрів сигналу та дозволяє виявити грубі порушення роботи радіотракту перед переходом до більш глибокого енергетичного та векторного аналізу.

6.3 Вимірювання радіочастотної потужності

Радіочастотна потужність є однією з базових характеристик сигналу в радіоканалах та бездротових мережах. Саме вона визначає енергетичний рівень передавання, впливає на дальність зв'язку, рівень завад та відповідність системи регламентованим нормам. На практиці вимірювання потужності є однією з перших операцій під час налагодження або діагностики радіочастотних пристроїв.

На відміну від вимірювань напруги чи струму, радіочастотна потужність не може бути коректно визначена звичайними універсальними приладами. Причина полягає у високих частотах сигналу та хвильовому характері передавання енергії. Тому для вимірювання RF-потужності застосовуються спеціалізовані вимірювачі, що враховують властивості ліній передачі та узгодження навантаження. **Вимірювачі потужності** складаються з сенсора та вимірювального блока (рис. 6.4). Сенсор підключається безпосередньо до радіочастотного тракту та перетворює енергію сигналу в електричну величину, пропорційну потужності. Вимірювальний блок виконує обробку сигналу, компенсацію температурних впливів і відображення результатів.



Рисунок 6.4 – Зовнішній вигляд вимірювача радіочастотної потужності та сенсора

Особливістю вимірювачів потужності є їх відносна незалежність від форми та типу модуляції сигналу. На відміну від осцилографа, який працює з миттєвими значеннями напруги, вимірювач потужності інтегрує енергію сигналу в часі, що забезпечує високу точність вимірювання середньої потужності навіть для складних цифрових сигналів. Саме тому такі прилади широко застосовуються для калібрування передавачів, контролю вихідної потужності та оцінювання енергетичного балансу радіоканалу.

У практиці розрізняють вимірювання **середньої** та **пікової** потужності. Середня потужність характеризує енергетичний баланс радіоканалу та використовується для оцінки дальності зв'язку. Пікова потужність є важливою для аналізу імпульсних і пакетних сигналів, а також для контролю перевантаження підсилювачів і передавачів. Для складних цифрових сигналів з великою варіацією амплітуди різниця між середньою та піковою потужністю може бути значною, що необхідно враховувати під час вимірювань.

Важливим аспектом вимірювань є узгодження вимірювального тракту. Невідповідність хвильового опору сенсора та тракту передавання призводить до відбиттів, які спотворюють результат вимірювання. Тому в практиці

використовуються калібрувальні процедури та коефіцієнти поправки, що враховують втрати в кабелях, атенюаторах і з'єднаннях. Особливо це критично на високих частотах, де навіть короткі з'єднувальні лінії можуть вносити помітні похибки.

Залежно від принципу дії розрізняють **термічні та діодні сенсори потужності**. Термічні сенсори забезпечують високу точність і використовуються як еталонні, тоді як діодні сенсори мають ширший динамічний діапазон і зручні для експлуатаційних вимірювань. Вибір типу сенсора визначається рівнем потужності, частотним діапазоном та вимогами до точності.

6.4 Аналізатор сигналів (Vector Signal Analyzer, VSA)

У сучасних бездротових мережах інформація передається за допомогою складних видів модуляції, у яких корисні дані закладені не лише в амплітуді сигналу, але й у його фазі та частоті. У таких умовах аналіз часової форми сигналу або лише його енергетичних характеристик є недостатнім. Для глибокої оцінки якості передавання застосовується **аналізатор сигналів, або Vector Signal Analyzer (VSA)**, який забезпечує комплексний аналіз радіосигналу у векторній формі.

Принцип роботи VSA ґрунтується на поданні радіочастотного сигналу у вигляді двох взаємно ортогональних складових – синфазної $I(t)$ та квадратурної $Q(t)$. Таке подання дозволяє повністю описати миттєвий стан сигналу в амплітудно-фазовому просторі (рис. 6.5). У цьому випадку сигнал може бути записаний у комплексній формі:

$$s(t) = I(t) + jQ(t). \quad (6.3)$$

Саме така форма подання є базовою для аналізу цифрових модуляцій у бездротових системах зв'язку.

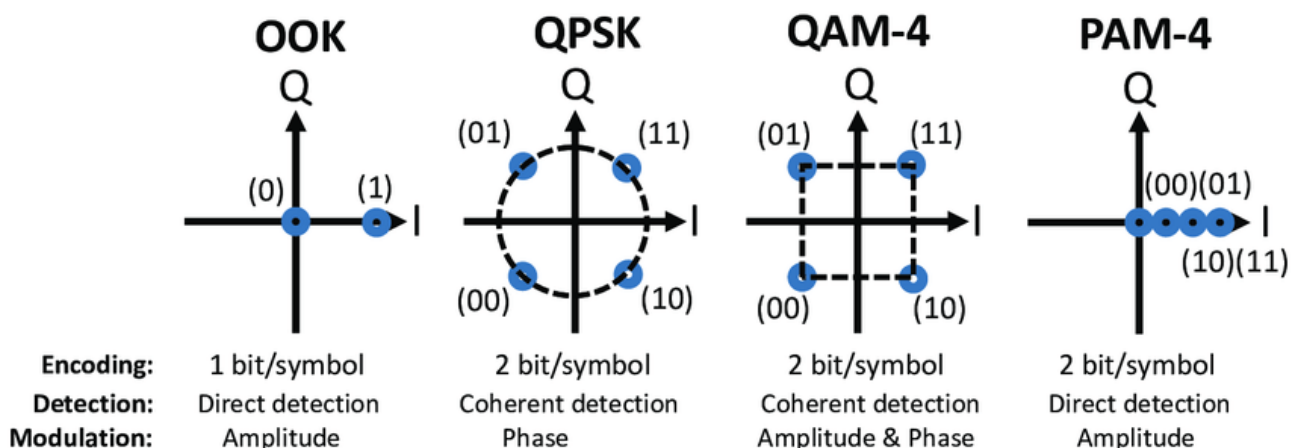


Рисунок 6.5 – Подання сигналу у вигляді I/Q-компонент

Аналізатор сигналів поєднує функції приймача, цифрової обробки сигналів і програмного аналізу. Радіочастотний сигнал знижується до проміжної або нульової частоти, оцифровується, після чого виконується цифрова демодуляція та обробка. Результатом є доступ до широкого набору параметрів, які безпосередньо характеризують якість сигналу та процес передавання інформації.

На відміну від осцилографа, VSA не просто відображає сигнал у часовій області, а дозволяє аналізувати його структуру з точки зору модуляції. За допомогою аналізатора сигналів оцінюються амплітудні та фазові відхилення, частотні нестабільності, а також помилки, що виникають під час модуляції та демодуляції. Особливу цінність має можливість візуалізації сигналу у вигляді **сузір'я** (constellation diagram), яке наочно демонструє відхилення реальних точок сигналу від ідеальних положень (рис. 6.6).

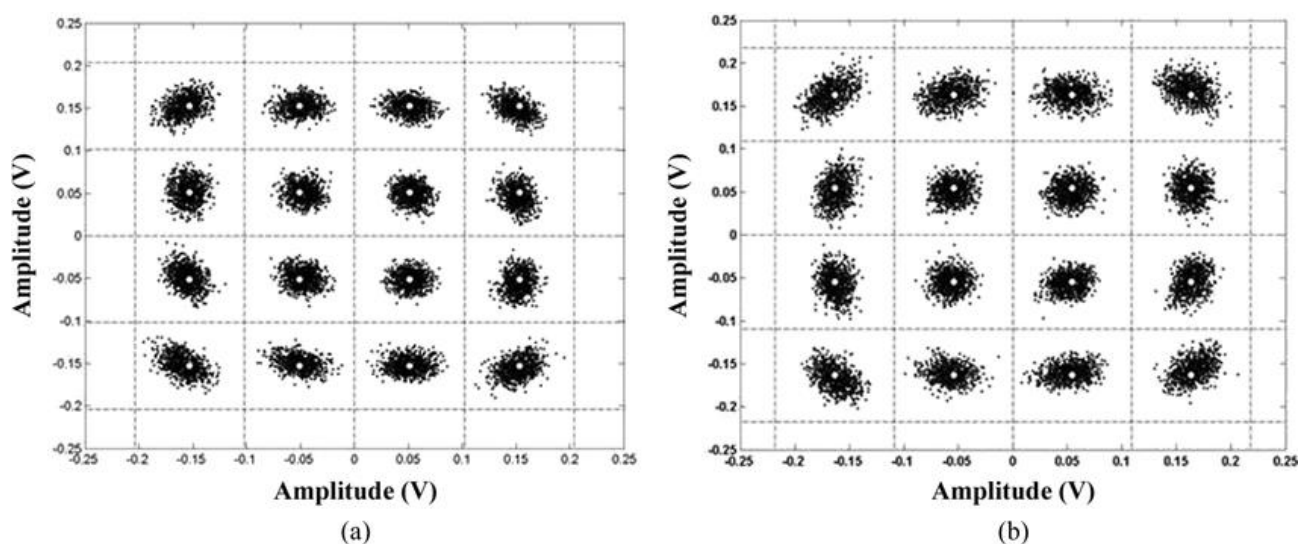


Рисунок 6.6 – Діаграма сузір'я модульованого сигналу

Типова процедура вимірювання за допомогою VSA починається з вибору центральної частоти та смуги аналізу, після чого виконується захоплення сигналу у часовій області. Далі застосовується відповідний алгоритм демодуляції, що дозволяє перейти до аналізу векторних параметрів. Такий підхід робить VSA універсальним інструментом для роботи з різними типами сигналів бездротових систем.

У практиці діагностики радіоканалів аналізатор сигналів використовується для оцінювання якості передавачів, приймачів і радіотрактів у цілому. Він дозволяє виявляти нелінійні спотворення, фазові зсуви, нестабільність генераторів і деградацію модуляції, які не можуть бути виявлені за допомогою осцилографа або вимірювача потужності. При цьому результати вимірювань VSA часто інтерпретуються спільно з даними про потужність сигналу, що забезпечує комплексний аналіз радіоканалу.

Таким чином, аналізатор сигналів є ключовим інструментом для оцінювання якості модуляції та інформаційних параметрів радіосигналів у бездротових мережах. Він логічно доповнює осцилограф і вимірювач радіочастотної потужності, забезпечуючи перехід від базового контролю сигналу до глибокого аналізу процесу передавання інформації.

На рисунку 6.7 узагальнено показано послідовність контрольних точок сигналу вздовж тракту формування та передавання радіосигналу – від етапу цифрової обробки до випромінювання сигналу антенною. Схема ілюструє, як змінюється фізична природа сигналу в процесі проходження тракту: від цифрових бітових послідовностей через аналогове базовосмугове подання I/Q до сигналів проміжної, радіочастоти та мікрохвильового діапазону. Відповідно до цього змінюються і засоби інструментального контролю: на початкових етапах доцільно застосовувати прилади для аналізу цифрових і часових параметрів, тоді як у радіочастотній частині тракту необхідні спеціалізовані вимірювальні інструменти для коректної оцінки енергетичних, частотних і векторних характеристик сигналу.

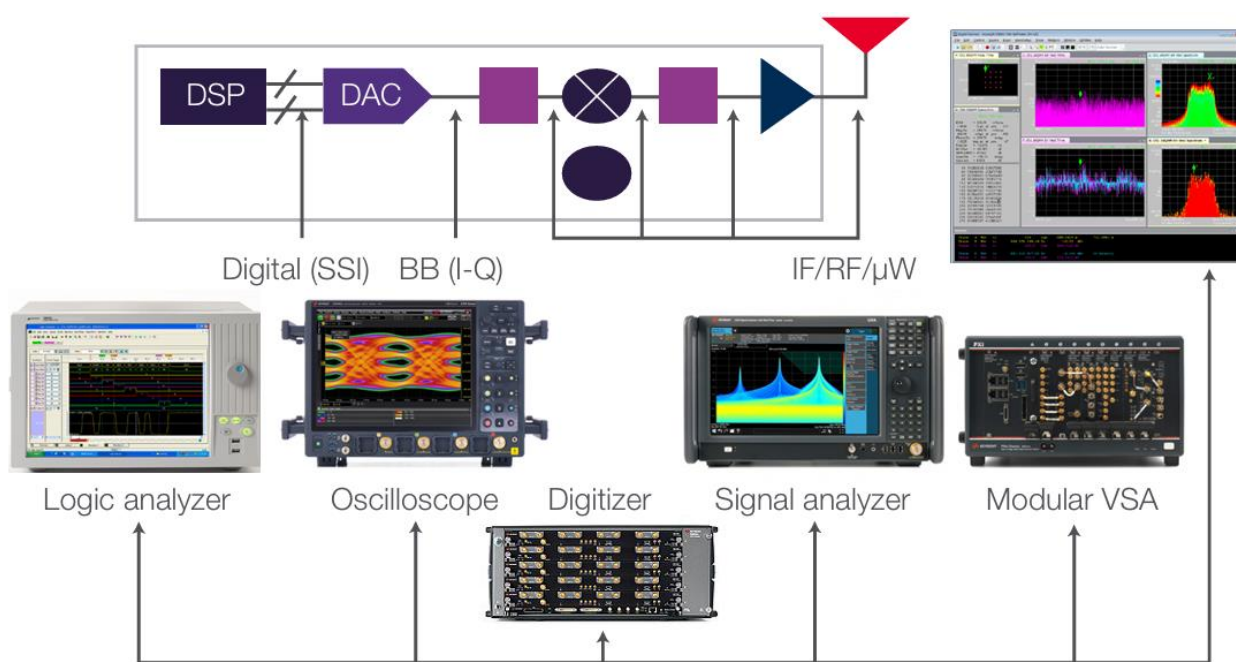


Рисунок 6.7 – Типові точки контролю сигналу вздовж тракту формування/передавання радіосигналу

Трак передавача/генератора тестового сигналу починається з блока DSP (Digital Signal Processing) – тут формується інформаційний потік та/або **цифрові відліки сигналу** (наприклад, дані для модуляції, фільтрація, формування символів). Далі сигнал переходить у цифровий інтерфейс (позначений як Digital (SSI)), яким дані подаються до DAC (цифро-аналогового перетворювача). На цьому етапі сигнал ще

«цифровий», фізично це лінії такту, даних, синхронізації, тобто вимірюють не RF-параметри, а коректність цифрового обміну (таймінги, рівні логіки, послідовності).

Після DAC з'являється аналоговий **базовосмуговий сигнал** – зона BB (I-Q). Тут зазвичай існують дві квадратурні складові I та Q, які разом описують амплітудно-фазовий стан модульованого сигналу. Поруч із DAC у схемі показаний проміжний функціональний блок (фіолетовий квадрат), який узагальнено відповідає за аналогові базовосмугові вузли (наприклад, фільтрацію, буферизацію/підсилення, узгодження рівнів для подальшого перетворення частоти). Саме в точках BB (I-Q) зручно перевіряти форму сигналів I/Q у часі, наявність обрізання (clipping), дисбаланс амплітуд, зсув нуля, перекид фаз.

Далі сигнал потрапляє в змішувач – ключовий вузол перетворення частоти. Для його роботи потрібен місцевий гетеродин (Local oscillator. Ще нижче наведено опорний генератор (Reference oscillator), який задає стабільну частотну опору для гетеродина та/або всієї системи синтезу частоти. У такій конфігурації підкреслено, що фазовий шум і стабільність опорної частоти прямо впливають на якість сформованого RF-сигналу.

Після змішувача тракт переходить у область IF/RF/ μ W (проміжна частота / радіочастота / мікрохвилі). Тут зазвичай стоять вузли підсилення/фільтрації і завершальний каскад/підсилювач, після якого сигнал подається на випромінювач/антену. Саме на цьому відрізку вже критичні втрати в лініях, узгодження, паразитні відбиття, нелінійність підсилювача, побічні продукти перетворення – тобто те, що формує реальну якість радіосигналу «в ефірі».

Кожній зоні сигналу відповідають вимірювальні, які підключаються в необхідних точках схеми.

Логічний аналізатор (Logic analyzer) прив'язаний до ділянки Digital (SSI). Це інструмент для контролю цифрового обміну між DSP і DAC: чи правильні рівні логіки, чи не порушені часові співвідношення, чи не виникають пропуски/спотворення даних, що потім проявляться як дефекти аналогового сигналу, хоча причина – суто «цифрова».

Осцилограф (Oscilloscope) прив'язаний до ділянки BB (I-Q). Осцилограф на цьому етапі показує I і Q як часові сигнали, дозволяє швидко виявляти перевантаження, обрізання, шум, наводки, асиметрію каналів I/Q, а також грубі проблеми синхронізації. Це перший і найбільш наочний контроль аналогового рівня до перетворення в RF.

Оцифровувач (Digitizer) розташований між осцилографом і аналізаторами RF не випадково: його роль – високошвидкісне дискретизування аналогового сигналу (часто I/Q або IF) з подальшим перенесенням даних у програмне середовище для

обробки. У контексті VSA-підходу digitizer часто виступає як «передній кінець» (front-end), який дає сирі відліки для подальшого векторного аналізу.

Аналізатор сигналів (Signal analyzer) під'єднаний до області IF/RF/ μ W. Він виконує аналіз високочастотного сигналу як радіочастотного об'єкта: рівень, частотні складові, ширина займаної смуги, стабільність, паразитні компоненти, а також (залежно від режимів) може давати базові оцінки якості модуляції. На рисунку це показано як окремий повноцінний прилад із власним екраном.

Modular VSA також підключається в області IF/RF/ μ W, але акцент робиться на модульності: це, як правило, платформа/шасі з вимірювальними модулями, яка разом із ПЗ реалізує саме векторний аналіз (I/Q-демодуляція, оцінка якості модуляції, статистики помилок, параметрів каналу тощо). Його відмінність від класичного аналізатора сигналів у тому, що частина функцій переноситься у програмну обробку та конфігурацію модулів.

Результат VSA-підходу виводиться екран програмного середовища аналізу, де на одному екрані можуть одночасно відображатися спектральні й часові представлення, діаграма сузір'я, статистичні метрики та допоміжні графіки.

Тема 7. Основи спектрального аналізу та принцип роботи спектроаналізатора

Часова та частотна області подання сигналів. Що таке спектроаналізатор. Супергетеродинна архітектура спектроаналізатора. Формування зображення спектра. Параметри спектроаналізатора. Детектори та методи усереднення спектральних вимірювань. Шум, шумовий поріг і чутливість спектроаналізатора. Динамічний діапазон спектроаналізатора та обмеження класичного swept-analysis

7.1 Часова та частотна області подання сигналів

У телекомунікаційних системах електричні сигнали є основними носіями інформації, тому їх коректне вимірювання та аналіз мають принципове значення для проєктування, налагодження і діагностики обладнання. Традиційно аналіз сигналів здійснюється у часовій області, де сигнал розглядається як функція часу. Саме таке подання є природним для осцилографів, які відображають миттєве значення напруги або струму залежно від часу та дозволяють досліджувати форму імпульсів, тривалість фронтів, перехідні процеси, коливання та нестабільності.

Разом із тим, часове подання не завжди дає повну інформацію про частотний склад сигналу. Навіть якщо форма сигналу істотно відрізняється від синусоїдальної, з часової діаграми часто неможливо однозначно визначити, які саме частотні складові спричиняють ці відхилення. Саме тому в телекомунікаціях широко застосовується аналіз у частотній області, де сигнал розглядається як сукупність гармонічних складових різної частоти та амплітуди (рис. 7.1).

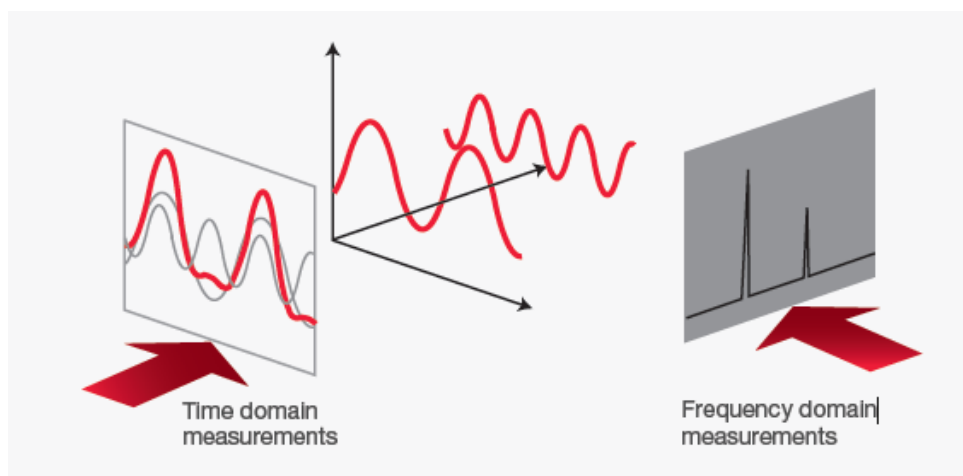


Рисунок 7.1 – Часове і спектральне представлення сигналу

Згідно з положеннями теорії Фур'є, будь-який детермінований сигнал може бути поданий у вигляді суми синусоїдальних коливань з певними частотами, амплітудами та фазами. У частотній області така сукупність відображається у вигляді спектра – графічного представлення розподілу енергії сигналу за частотами. При цьому кожна гармонічна складова відповідає окремій спектральній лінії, а її амплітуда характеризує внесок відповідної частоти у формування сигналу.

Інтерпретація спектра як набору гармонік є особливо важливою для аналізу телекомунікаційних сигналів. Наприклад, наявність вищих гармонік може свідчити про нелінійні спотворення в підсилювачах, модуляторах або перетворювачах частоти. Інтермодуляційні складові, що виникають при одночасній передачі кількох сигналів, часто потрапляють у робочу смугу приймача і викликають взаємні завади, які неможливо усунути фільтрацією. Саме тому частотна область є базовою для аналізу спектральної чистоти, побічних випромінювань та електромагнітної сумісності телекомунікаційних систем.

Слід зазначити, що між часовою та частотною областями існує принциповий взаємозв'язок. Ідеально точне спектральне представлення можливе лише за умови спостереження сигналу протягом нескінченно довгого часу. На практиці будь-яке вимірювання здійснюється в обмеженому часовому інтервалі, що неминуче впливає на результати спектрального аналізу. Обмеження тривалості спостереження призводить до розширення спектральних ліній, появи бічних пелюсток та зниження частотної роздільної здатності.

Для неперіодичних або короткотривалих сигналів спектр має неперервний характер, а не дискретну структуру. Це означає, що енергія сигналу розподіляється в певному діапазоні частот, і вимірний спектр залежить не лише від властивостей самого сигналу, а й від параметрів вимірювального приладу та режиму аналізу. Таким чином, інтерпретація спектральних результатів завжди повинна здійснюватися з урахуванням часових обмежень вимірювання.

У контексті інструментальних вимірювань це означає, що **осцилограф і спектроаналізатор** не є взаємозамінними приладами, а доповнюють один одного. Часова область є незамінною для дослідження швидкоплинних процесів та імпульсних характеристик, тоді як частотна область забезпечує глибоке розуміння спектрального складу сигналів, джерел завад і нелінійних спотворень. Саме спектроаналізатор є основним інструментом для такого аналізу, оскільки він дозволяє безпосередньо вимірювати амплітуду сигналу як функцію частоти.

7.2 Що таке спектроаналізатор

Спектроаналізатор є базовим вимірювальним приладом у телекомунікаціях, призначеним для дослідження сигналів у частотній області. Його основною функцією є вимірювання амплітуди або потужності сигналу як функції частоти в заданому діапазоні. На відміну від осцилографа, який відображає сигнал у часовій області, спектроаналізатор дозволяє безпосередньо спостерігати частотний склад сигналу, виявляти окремі спектральні компоненти та оцінювати їх рівні.

У найзагальнішому інженерному трактуванні спектроаналізатор можна розглядати як **частотно-вибірковий вольтметр**, калібрований таким чином, щоб результати вимірювання відображалися у вигляді спектра. Для кожного вузького інтервалу частот прилад вимірює діюче значення напруги або еквівалентної потужності сигналу, а потім послідовно перебирає весь заданий частотний діапазон. У результаті формується графік залежності рівня сигналу від частоти, який і є спектральним зображенням.

Частотна вибірковість спектроаналізатора досягається за рахунок використання внутрішніх фільтрів з вузькою смугою пропускання та керованого перебудовування частоти. Це дозволяє приладу «сканувати» спектр сигналу, виділяючи окремі частотні компоненти навіть за наявності значного шумового фону або сусідніх сигналів. Завдяки цьому спектроаналізатор є незамінним інструментом для аналізу багаточастотних і широкосмугових телекомунікаційних сигналів.

Важливо підкреслити, що спектроаналізатор **не є вимірювачем потужності у класичному розумінні**, хоча результати вимірювань часто відображаються у ватах або децибелах відносно мілівата. Вимірювач потужності визначає інтегральну потужність сигналу в заданій смузі частот або на конкретній частоті, зазвичай без інформації про внутрішній спектральний розподіл цієї потужності. Такий підхід є достатнім для оцінки загального рівня сигналу, але не дозволяє виявити гармоніки, побічні складові або інтермодуляційні спотворення.

На відміну від цього, спектроаналізатор розподіляє вимірювану потужність за частотами. Це означає, що два сигнали з однаковою сумарною потужністю можуть мати різні спектри, і лише спектроаналізатор дає змогу виявити ці відмінності.

Ще однією суттєвою відмінністю є залежність показів спектроаналізатора від параметрів вимірювання, таких як смуга пропускання фільтрів, швидкість сканування та метод детектування. Це означає, що спектроаналізатор відображає не лише властивості сигналу, але й результат взаємодії сигналу з вимірювальною системою.

7.3 Супергетеродинна архітектура спектроаналізатора

Переважає більшість класичних і сучасних спектроаналізаторів побудована за супергетеродинним принципом (рис. 7.2).

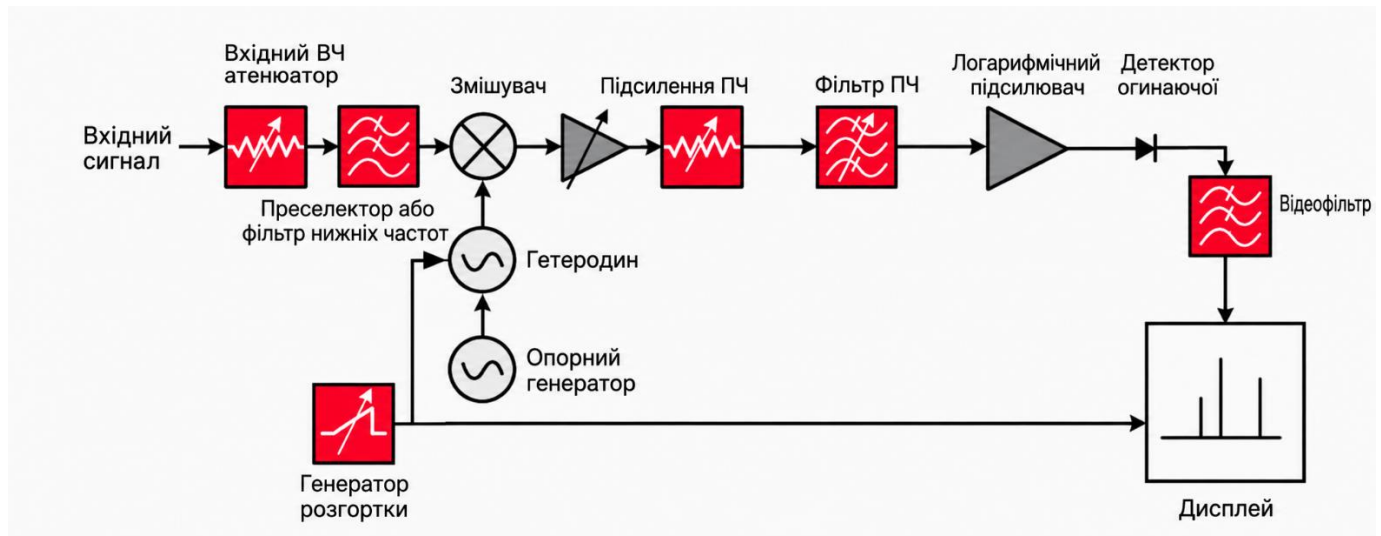


Рисунок 7.2 – Структурна схема

У загальному вигляді супергетеродинний спектроаналізатор складається з послідовності функціональних блоків, які забезпечують перетворення вхідного високочастотного сигналу до фіксованої проміжної частоти з подальшою фільтрацією та вимірюванням. Вхідний сигнал спочатку надходить на вхідний атенюатор, який дозволяє узгодити рівень сигналу з допустимим діапазоном внутрішніх трактів аналізатора та запобігти перевантаженню нелінійних елементів. Далі сигнал проходить через попередній селективний фільтр, призначений для обмеження спектра сигналу і зменшення впливу дзеркальних каналів.

Ключовим елементом супергетеродинної архітектури є змішувач, у якому вхідний сигнал взаємодіє з сигналом локального генератора. Змішування є нелінійним процесом, у результаті якого на виході з'являються складові з частотами, що дорівнюють сумі та різниці частот вхідного сигналу і локального генератора. Саме різницева складова використовується для формування проміжної частоти, яка є сталою або змінюється у вузьких межах, незалежно від частоти вхідного сигналу.

Проміжна частота відіграє центральну роль у роботі спектроаналізатора. Перенесення сигналу на фіксовану проміжну частоту дозволяє застосовувати високоякісні фільтри з точно визначеною смугою пропускання, які забезпечують необхідну частотну роздільну здатність. Саме в тракті проміжної частоти реалізується основна селективність спектроаналізатора, а також формується компроміс між роздільною здатністю, рівнем шуму та швидкістю вимірювання.

Після фільтрації на проміжній частоті сигнал підсилюється, детектується та перетворюється у низькочастотний або відеосигнал, пропорційний амплітуді

відповідної спектральної складової. Цей сигнал далі використовується для формування відображення на екрані приладу або для цифрової обробки у сучасних аналізаторах.

Локальний генератор у супергетеродинному спектроаналізаторі виконує не лише функцію формування сигналу для змішування, але й визначає принцип частотного сканування. Його частота перебудовується у часі за заданим законом, що призводить до послідовного перенесення різних ділянок спектра вхідного сигналу на проміжну частоту. Таким чином, у кожен момент часу через фільтр проміжної частоти проходить лише вузька смуга спектра, а вся частотна область аналізується послідовно.

Принцип частотного сканування полягає у синхронній зміні частоти локального генератора та горизонтальної координати відображення. Коли локальний генератор змінює свою частоту, спектроаналізатор «переглядає» різні частотні компоненти сигналу, а результати вимірювань відкладаються вздовж осі частоти. Вертикальна координата при цьому відповідає амплітуді або потужності відповідної спектральної складової. Швидкість сканування визначається часом перебудови локального генератора і параметрами фільтрів проміжної частоти, що безпосередньо впливає на точність і стабільність вимірювань.

Суттєвою особливістю супергетеродинного аналізатора є те, що він не вимірює весь спектр одночасно, а формує його послідовно у часі.

Після проходження сигналу через фільтр проміжної частоти виконується детектування, тобто перетворення високочастотного сигналу у сигнал, пропорційний його амплітуді або потужності. Процес детектування визначає, яким чином спектроаналізатор оцінює рівень сигналу в межах кожної частотної точки. У класичних аналізаторах детектування здійснюється після випрямлення та фільтрації сигналу, внаслідок чого формується так званий відеосигнал, що відображає зміну амплітуди у часі.

Відображення амплітуди на екрані спектроаналізатора зазвичай здійснюється у логарифмічному масштабі, що дозволяє одночасно спостерігати сигнали з великим динамічним діапазоном. Такий підхід є зручним для телекомунікаційних вимірювань, оскільки дає змогу виявляти слабкі побічні складові на фоні потужних основних сигналів. Водночас логарифмічне відображення вимагає обережності при інтерпретації результатів, особливо при порівнянні рівнів, отриманих за різних режимів детектування та усереднення.

7.4 Параметри спектроаналізатора

Ключовим параметром, який визначає характер формування спектрального зображення, є **час розгортки**, або *sweep time*. Sweep time визначається як час, необхідний спектроаналізатору для перебудови локального генератора по всій заданій смузі частот і, відповідно, для вимірювання всіх частотних компонентів у цьому діапазоні. Фізично sweep time відображає компроміс між швидкістю вимірювання та точністю амплітудно-частотного аналізу.

Під час сканування локальний генератор змінює свою частоту безперервно або квазібезперервно, а кожна вузька ділянка спектра по черзі переноситься на проміжну частоту і проходить через фільтр роздільної здатності. Для того щоб вимірювання амплітуди було коректним, сигнал повинен перебувати в смузі пропускання цього фільтра достатньо довго. Якщо sweep time вибрано надто малим, фільтр не встигає встановитися, і виміряний рівень сигналу буде заниженим або спотвореним. Таким чином, мінімально допустимий час розгортки безпосередньо залежить від ширини смуги роздільної здатності та обраної смуги аналізу.

З практичної точки зору sweep time можна розглядати як параметр, що пов'язує частотну область із часовою. Чим повільніше виконується розгортка, тим ближче вимірювання наближається до стаціонарного режиму, у якому кожна спектральна складова оцінюється з високою точністю. Водночас збільшення sweep time означає, що повне оновлення спектра відбувається рідше, що обмежує можливість спостереження швидкозмінних процесів.

Одними з найважливіших параметрів спектроаналізатора є **смуги пропускання**, які визначають, яку частину спектра сигналу прилад фактично аналізує у кожен момент часу та яким чином формується виміряний рівень сигналу.

Найбільш важливими з практичної точки зору є смуга роздільної здатності та відеосмуга. Вони визначають, наскільки точно спектроаналізатор може розрізняти близько розташовані частотні компоненти та яким чином пригнічуються флуктуації шуму на відображенні спектра.

Смуга роздільної здатності, або *Resolution Bandwidth (RBW)*, визначається шириною фільтра проміжної частоти спектроаналізатора. Фізично RBW задає мінімальний інтервал частот, у межах якого спектроаналізатор інтегрує енергію сигналу для формування одного відліку спектра. Чим вужча смуга роздільної здатності, тим точніше прилад може відокремити близько розташовані спектральні складові та тим вища частотна роздільна здатність аналізу.

Водночас зменшення RBW супроводжується збільшенням часу вимірювання. Оскільки вузький фільтр має більший час встановлення, спектроаналізатор змушений

зменшувати швидкість сканування, що призводить до зростання часу розгортки. Крім того, при зменшенні RBW зменшується шумова смуга аналізу, унаслідок чого знижується рівень відображуваного шуму. Це дозволяє виявляти слабкі сигнали, які були б приховані шумом за ширших значень RBW.

Для аналізу сигналів з близько розташованими спектральними компонентами або для вимірювання рівнів побічних випромінювань зазвичай використовують вузькі значення RBW. Натомість для швидкого оглядового аналізу широкосмугових сигналів застосовують ширші смуги роздільної здатності.

Відеосмуга, або *Video Bandwidth (VBW)*, визначається параметрами низькочастотного фільтра, який обробляє сигнал після детектування. На відміну від RBW, відеосмуга не впливає на частотну роздільну здатність спектроаналізатора, а визначає ступінь згладжування відображеного спектра у часі. Фізично VBW обмежує швидкість зміни відеосигналу, усереднюючи флуктуації амплітуди, спричинені шумом або нестабільністю сигналу.

Зменшення відеосмуги призводить до більш гладкого спектрального зображення та зменшення видимих шумових коливань. Це полегшує візуальне спостереження слабких сигналів і спрощує оцінку їх рівнів. Однак надмірне зменшення VBW може призвести до запізнення відображення та спотворення сигналів, амплітуда яких швидко змінюється. Тому відеосмуга повинна вибиратися з урахуванням характеру аналізованого сигналу та завдань вимірювання.

7.5 Детектори та методи усереднення спектральних вимірювань

Після проходження сигналу через фільтр проміжної частоти та детектування амплітуди спектроаналізатор повинен визначити, яке саме значення сигналу буде використане для формування окремої точки спектра. Цей етап вимірювання реалізується за допомогою детектора і суттєво впливає на вигляд спектрального зображення, особливо у випадку шумоподібних, імпульсних або цифрово модульованих сигналів.

Детектування полягає у виборі характерного значення відеосигналу в межах кожної частотної точки під час сканування. Оскільки сигнал і шум мають випадкові флуктуації, різні методи детектування можуть призводити до різних вимірених рівнів навіть за однакових умов аналізу. Тому вибір типу детектора має виконуватися з урахуванням мети вимірювання та властивостей сигналу.

Одним із найпоширеніших режимів є **пікове детектування**, за якого для кожної частотної точки фіксується максимальне значення сигналу (рис. 7.3). Такий режим є корисним для виявлення короткочасних імпульсів, побічних випромінювань і

рідкісних спектральних подій. Водночас піковий детектор схильний до завищення рівня шуму, оскільки випадкові шумові флуктуації також можуть досягати високих миттєвих значень. Це необхідно враховувати при вимірюванні слабких сигналів поблизу шумового порога.

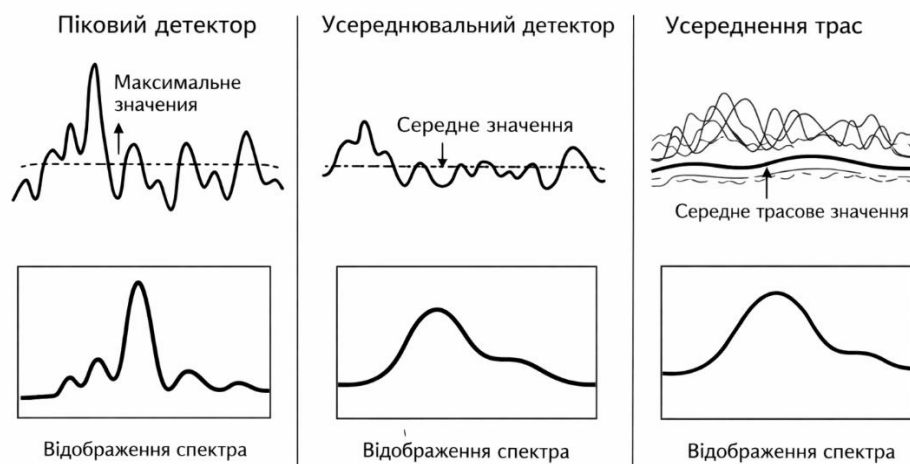


Рисунок 7.3 – Методи детектування

Альтернативним підходом є **усереднювальне детектування**, за якого для кожної частотної точки визначається середнє значення сигналу за певний інтервал часу. Такий режим забезпечує більш стабільне відображення спектра та дозволяє точніше оцінювати середній рівень шуму або сигналів з шумоподібною структурою. Усереднювальне детектування широко застосовується при аналізі цифрових телекомунікаційних сигналів, де миттєві значення амплітуди можуть істотно змінюватися внаслідок модуляції.

Окрім вибору типу детектора, у спектроаналізаторах застосовуються методи усереднення спектральних вимірювань, які дозволяють зменшити вплив випадкових флуктуацій і підвищити відтворюваність результатів. Одним із таких методів є **відеоусереднення**, яке реалізується шляхом обмеження відеосмуги VBW. У цьому випадку згладжування відбувається безпосередньо під час формування відеосигналу, і ефект усереднення проявляється в межах одного sweep time.

Іншим поширеним методом є **усереднення трас**, за якого результати кількох послідовних розгортки усереднюються для кожної частотної точки. Такий підхід дозволяє отримати більш точну оцінку середнього спектра сигналу, особливо у випадку несталих або статистично змінних процесів. На відміну від відеоусереднення, усереднення трас не впливає на окрему розгортку, але потребує більшого загального часу вимірювання для досягнення заданого рівня згладжування.

Суттєвою особливістю методів усереднення є те, що вони по-різному впливають на сигнали з часовою мінливістю. Якщо спектральні характеристики сигналу

змінюються від розгортки до розгортки, відеоусереднення може відображати різні значення на кожному проході, тоді як усереднення трас поступово формує результат, ближчий до статистично середнього спектра. Тому вибір методу усереднення повинен відповідати характеру сигналу та завданню вимірювання.

7.6 Шум, шумовий поріг і чутливість спектроаналізатора

Будь-який спектроаналізатор, як і будь-який реальний вимірювальний прилад, має власні внутрішні шумові джерела, які обмежують можливість виявлення слабких сигналів. Тому при спектральному аналізі важливо розрізняти шум досліджуваного сигналу та шум, що вноситься самим приладом. Саме внутрішній шум спектроаналізатора визначає нижню межу вимірюваних рівнів і безпосередньо пов'язаний з поняттям чутливості.

Шум у спектроаналізаторі формується внаслідок теплових, електронних та квантових процесів у входних підсилювачах, змішувачах і фільтрах проміжної частоти. Цей шум рівномірно розподілений у частотній області та відображається на екрані аналізатора у вигляді шумового фону. Його рівень залежить від температури, характеристик активних елементів і параметрів вимірювання, насамперед від смуги роздільної здатності.

Шумовий поріг спектроаналізатора визначається як мінімальний рівень сигналу, який може бути надійно відокремлений від внутрішнього шуму приладу. Практично він відповідає середньому рівню шумового фону, що спостерігається на екрані аналізатора за відсутності входного сигналу або при підключенні узгодженого навантаження. Сигнали, рівень яких є близьким до шумового порога, стають важко помітними або взагалі невідрізненими від шуму.

Чутливість спектроаналізатора характеризує його здатність виявляти слабкі сигнали і тісно пов'язана з шумовим порогом. Чим нижчий шумовий поріг, тим вища чутливість приладу. Одним із найефективніших способів зниження видимого рівня шуму є зменшення смуги роздільної здатності RBW. Оскільки шумова потужність пропорційна ширині смуги аналізу, звуження RBW призводить до зменшення шумового фону і дозволяє виявляти сигнали з меншим рівнем.

Водночас важливо розуміти, що зменшення RBW не змінює фізичну потужність шуму, а лише обмежує частотний інтервал, у межах якого цей шум інтегрується. Тому зниження шумового порога досягається ціною збільшення часу вимірювання, оскільки вузькі фільтри мають більший час встановлення і потребують більшого sweep time. Це ще раз підкреслює компроміс між чутливістю та швидкістю аналізу.

Окрім RBW, на сприйняття шуму впливають режими детектування та усереднення. Усереднювальні детектори та усереднення трас дозволяють стабілізувати відображення шумового фону і точніше оцінити його середній рівень, проте не зменшують реальну шумову потужність. Зменшення відеосмуги VBW призводить до згладжування флуктуацій шуму, але також не знижує його фізичний рівень. Тому для реального підвищення чутливості вирішальним параметром залишається смуга роздільної здатності.

Суттєвим фактором, що впливає на чутливість спектроаналізатора, є також режим роботи вхідного тракту. Використання попереднього підсилювача дозволяє зменшити вплив шуму наступних каскадів і тим самим знизити ефективний шумовий поріг приладу. Проте надмірне підсилення може призвести до перевантаження змішувача та зростання нелінійних спотворень, що обмежує практичну доцільність такого підходу.

7.7 Динамічний діапазон спектроаналізатора та обмеження класичного swept-analysis

Однією з ключових характеристик спектроаналізатора є його **динамічний діапазон**, який визначає здатність приладу одночасно вимірювати сильні та слабкі спектральні компоненти без спотворень. У практиці телекомунікаційних вимірювань динамічний діапазон визначає, наскільки коректно можуть бути виявлені слабкі сигнали або побічні випромінювання на фоні потужних несучих.

Динамічний діапазон обмежується не лише шумовим порогом, а й нелінійними властивостями вхідного тракту спектроаналізатора. При підвищенні рівня вхідного сигналу активні елементи, зокрема змішувач і підсилювачі, починають працювати в нелінійному режимі. У результаті в спектрі з'являються додаткові складові, які не були присутні у вхідному сигналі. Ці складові називають інтермодуляційними спотвореннями.

Інтермодуляційні складові виникають у разі одночасної наявності кількох сигналів різної частоти і мають частоти, що є комбінаціями цих частот. Найбільш небезпечними є інтермодуляційні складові низького порядку, оскільки вони можуть потрапляти у робочу смугу аналізу і маскувати або імітувати реальні сигнали. У такій ситуації стає складно визначити, чи спостережувана спектральна лінія належить досліджуваному сигналу, чи є артефактом вимірювального приладу.

Таким чином, реальний динамічний діапазон спектроаналізатора обмежується з двох боків: знизу – шумовим порогом, а зверху – рівнем, при якому починають проявлятися нелінійні спотворення. Це означає, що коректні спектральні

вимірювання можливі лише в певному інтервалі рівнів сигналу, і вихід за його межі призводить до спотворення результатів. Саме тому під час вимірювань необхідно контролювати рівень вхідного сигналу та використовувати вхідні атенюатори для запобігання перевантаженню.

Зазначені обмеження тісно пов'язані з принципом роботи класичного супергетеродинного спектроаналізатора, який реалізує так званий *swept-analysis*. У цьому режимі аналіз спектра здійснюється послідовно у часі шляхом перебудови локального генератора. Кожна вузька частотна ділянка вимірюється в окремий момент часу, і повне спектральне зображення формується лише після завершення всієї розгортки.

Такий підхід є ефективним для стаціонарних або повільно змінних сигналів, але має принципові обмеження при аналізі коротких, імпульсних або швидкозмінних процесів. Якщо сигнал присутній лише протягом частини sweep time, спектроаналізатор може не «побачити» його або зафіксувати лише частину спектральної енергії. У результаті виміряний спектр може бути неповним або взагалі не відповідати реальним характеристикам сигналу.

Крім того, для імпульсних сигналів спектральна енергія розподіляється у широкому частотному діапазоні, але у класичному swept-analysis кожна частотна складова вимірюється у різний момент часу. Це призводить до того, що спектр відображає не миттєву частотну картину, а суміш результатів, отриманих у різні моменти. Така особливість унеможливорює коректний аналіз одиночних імпульсів, коротких пакетів даних і швидкоплинних завад.

Тема 8. Корпоративні та промислові мережі. Локальна та операційна діагностика

Роль локальної та операційної діагностики в промислових мережах. Типові відмови корпоративних і промислових мереж. Діагностика каналного рівня. Діагностика топології та логіки мережі. Діагностика бездротових сегментів. Аналіз мережевого трафіку. Базові мережеві вимірювання доступності

1. Роль локальної та операційної діагностики в промислових мережах

Сучасні корпоративні та промислові мережі є критичним елементом автоматизованих систем керування, оскільки забезпечують обмін даними між контролерами, периферійними пристроями, операторськими станціями та сервісними системами. Відмови або деградація мережевих з'єднань безпосередньо впливають на доступність технологічного процесу, коректність керування та безпеку експлуатації. У практиці промислової автоматизації значна частина несправностей має саме мережеву природу й пов'язана з каналним або мережевим рівнями моделі OSI.

Інтегрована діагностична концепція передбачає узгоджене використання різних діагностичних механізмів на всіх рівнях автоматизованої системи – від окремих пристроїв до мережі в цілому (рис. 8.1). Її ключовою ідеєю є поєднання локальних, операційних і керівних засобів діагностики в єдину систему, яка забезпечує безперервне спостереження за станом обладнання, комунікацій та мережевих сервісів.

У межах такої концепції кожен мережевий компонент не лише виконує свою основну функцію передавання даних, а й виступає джерелом діагностичної інформації. Ця інформація може бути використана як локально – для швидкого виявлення несправностей, так і на вищих рівнях – для аналізу тенденцій, планування обслуговування та запобігання відмовам. Таким чином, діагностика перестає бути окремою процедурою і стає невід'ємною частиною експлуатації промислової мережі.

Важливою рисою інтегрованої діагностики є багаторівнева організація. У загальному випадку доцільно виділяти локальний, операційний та керівний рівні виконання діагностики.

Локальна та операційна діагностика є першою і найбільш оперативною ланкою виявлення таких несправностей. Її основне призначення полягає не в глибокому аналітичному дослідженні мережі, а у швидкому визначенні факту відмови, локалізації проблемної ділянки та встановленні найбільш імовірної причини порушення зв'язку. Саме ці рівні діагностики використовуються під час

пусконалагоджувальних робіт, сервісного обслуговування та первинного реагування на аварійні ситуації.

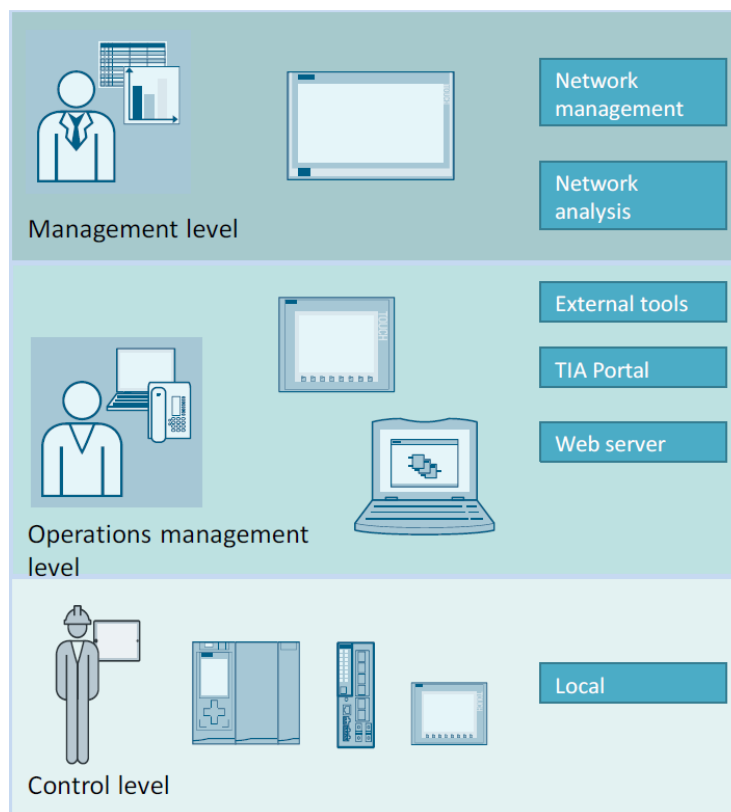


Рисунок 8.1 – Концепція інтегрованої діагностики

Локальний рівень діагностики безпосередньо пов'язаний із фізичними пристроями та апаратними модулями. На цьому рівні здійснюється контроль стану окремих компонентів: живлення, портів, інтерфейсів, каналів передавання, температури, внутрішніх помилок. Діагностична інформація зазвичай подається у простій та наочній формі – через індикатори стану, дисплеї або локальні повідомлення. Локальна діагностика дозволяє оперативно визначити, чи є пристрій працездатним, і часто використовується під час пусконалагоджувальних робіт або обслуговування безпосередньо на об'єкті.

Операційний рівень діагностики орієнтований на аналіз роботи системи в процесі експлуатації. На цьому рівні діагностична інформація агрегується від декількох пристроїв і подається оператору або інженеру у зручному для аналізу вигляді. Операційна діагностика дозволяє відстежувати стан з'єднань, якість передавання даних, наявність перевантажень, нестабільних сегментів мережі або порушень у взаємодії між вузлами. Важливою особливістю цього рівня є можливість виявлення відхилень від нормального режиму роботи без зупинки системи та підтримка прийняття рішень щодо поточного реагування.

Керівний рівень діагностики забезпечує централізований контроль і довгостроковий аналіз стану телекомунікаційної системи в цілому. Тут здійснюється збір діагностичних даних з усієї мережі, їх архівування, кореляція подій і виявлення тенденцій. Діагностика на цьому рівні використовується не лише для пошуку конкретних несправностей, а й для оцінювання надійності, планування модернізації, оптимізації топології та прогнозування потенційних проблем. Таким чином, керівний рівень є основою для стратегічного управління експлуатацією мережі.

Інтегрований підхід особливо важливий для промислових мереж, де простий обладнання має значні економічні наслідки, а доступ до окремих вузлів може бути ускладненим. Завдяки інтегрованій діагностиці зменшується час локалізації несправностей і підвищується загальна надійність мережевої інфраструктури.

У телекомунікаційних системах, що застосовуються в автоматизованих та кіберфізичних комплексах, діагностичні засоби доцільно розглядати не ізольовано, а в контексті ієрархічної структури системи керування. У таблиці 1 наведено ієрархічну класифікацію діагностичних засобів відповідно до піраміди автоматизації, що відображає логіку їх застосування в промислових мережах. Нижні рівні піраміди орієнтовані на швидку локальну діагностику апаратних і каналних проблем, тоді як середні рівні забезпечують операційний аналіз мережевих з'єднань і трафіку в процесі роботи системи. Верхні рівні призначені для централізованого моніторингу, узагальнення діагностичних даних і підтримки рішень на етапі експлуатації. Такий розподіл дозволяє інженеру послідовно переходити від простих і швидких перевірок до комплексного аналізу стану мережі.

Таблиця 8.1 – Класифікація діагностичних засобів

Рівень піраміди автоматизації	Характер діагностики	Типові діагностичні засоби	Основне призначення
Керівний рівень	Інтегрована, довготривала, проактивна	SNMP, RMON, SINEC NMS, централізовані журнали подій	Комплексний моніторинг мережі, накопичення статистики, аналіз тенденцій, підтримка експлуатаційних рішень
Операційно-керівний рівень	Віддалена, узагальнена	Web Based Management, Syslog, SMTP-оповіщення, Remote Capture	Віддалений контроль стану мережі, оповіщення про події, доступ до діагностики без фізичної присутності
Операційний рівень)	Поточна, прикладна	Wireshark, Port Mirroring, Ping, PRONETA, Signal Recorder	Аналіз трафіку, перевірка доступності вузлів, пошук логічних помилок і порушень обміну даними

Рівень піраміди автоматизації	Характер діагностики	Типові діагностичні засоби	Основне призначення
Локально-операційний рівень	Канальний і фізичний контроль	Кабельні тестери (мідні, оптичні), FMP-діагностика, Spectrum Analyzer, Loop Detection	Виявлення деградації каналу, завад, петель, перевантажень і фізичних дефектів
Локальний рівень	Безпосередня, апаратна	LED-індикація, відображення стану CPU, системна діагностика пристрою	Швидке виявлення відмов обладнання та базова локалізація несправності на місці

У сучасних телекомунікаційних системах діагностика реалізується за допомогою широкого спектра інструментів, які відрізняються рівнем інтеграції, глибиною аналізу та масштабом охоплення системи.

Вбудовані інструменти діагностики є складовою частиною телекомунікаційного або керуючого обладнання і функціонують без потреби у додаткових апаратних чи програмних засобах. Вони забезпечують контроль стану пристрою та його інтерфейсів у режимі реального часу. До таких інструментів належать індикатори стану, локальні дисплеї, внутрішні діагностичні буфери, системні повідомлення, а також програмні механізми діагностики, інтегровані в середовище конфігурації або користувацькі програми. Основною перевагою вбудованих засобів є миттєва доступність діагностичної інформації та можливість швидкого виявлення апаратних і системних збоїв без залучення зовнішніх ресурсів. Водночас ці інструменти зазвичай обмежені локальним контекстом і не дають повної картини стану мережі в цілому.

Мережеві інструменти діагностики орієнтовані на аналіз взаємодії між пристроями та параметрів передавання даних у межах мережі. Вони дозволяють оцінювати стан з'єднань, навантаження портів, наявність помилок передавання, завад або топологічних порушень. Такі інструменти часто реалізуються у вигляді вбудованих сервісів мережевого обладнання або протокольних механізмів, що забезпечують збір статистики та подій. Мережеві засоби діагностики є ключовими для операційного контролю та виявлення нестабільних або перевантажених сегментів, особливо в розподілених телекомунікаційних системах.

Зовнішні інструменти діагностики застосовуються у випадках, коли вбудованих і мережевих засобів недостатньо для повного аналізу проблеми. Вони функціонують незалежно від конкретного мережевого пристрою та, як правило, встановлюються на окремих робочих станціях або серверах. Такі інструменти

дозволяють виконувати глибокий аналіз трафіку, протоколів, часових характеристик та взаємодії між вузлами мережі. Зовнішні засоби забезпечують високу деталізацію діагностичної інформації і широко використовуються для пошуку складних або нетипових несправностей, аудиту мережі та аналізу інцидентів. Їхнім обмеженням є підвищені вимоги до кваліфікації персоналу та можливий вплив на мережу під час активного аналізу.

8.2 Типові відмов в корпоративних і промислових мереж

Корпоративні та промислові мережі функціонують у складних умовах експлуатації, що поєднують електромагнітні завади, протяжні лінії зв'язку, різномірне обладнання та безперервний режим роботи. У таких системах відмови, як правило, не виникають раптово, а є наслідком поступової деградації фізичного середовища, помилок конфігурації або перевантаження мережевих сегментів.

На каналному рівні найпоширенішими є відмови, пов'язані з фізичним середовищем передавання. Для мідних ліній це обриви жил, короткі замикання, погіршення контактів у роз'ємах, що проявляється у вигляді помилкових кадрів, повторних передавань і нестабільного з'єднання. В оптичних лініях типовими є втрати потужності, деградація волокна, забруднення конекторів або температурні впливи на приймально-передавальні модулі, які призводять до поступового зниження якості каналу без повного обриву зв'язку.

На рівні топології мережі поширеними є помилки структури з'єднань, зокрема виникнення мережевих петель. Такі відмови особливо небезпечні для комутованих промислових мереж, оскільки спричиняють лавиноподібне зростання broadcast- і multicast-трафіку, різке збільшення затримок та фактичну зупинку обміну даними між вузлами. У багатьох випадках мережа формально залишається «працездатною», однак керування технологічним процесом стає нестабільним або некоректним.

Для бездротових сегментів характерними є відмови, пов'язані з умовами радіопоширення. Завади від сторонніх джерел, перекриття каналів між точками доступу, екранування сигналу конструктивними елементами або рухомими об'єктами призводять до зниження рівня сигналу, зростання кількості повторних передавань і втрати пакетів. Такі проблеми часто мають локальний характер і проявляються лише в окремих зонах або під час руху клієнтів.

На мережевому рівні типові відмови пов'язані з логічною доступністю вузлів і характером трафіку. Неправильна адресація, помилки маршрутизації, перевантаження окремих сегментів або поява несанкціонованих пристроїв можуть призводити до зростання затримок, втрати пакетів і нестабільної роботи прикладних

сервісів. У промислових мережах такі відмови особливо критичні, оскільки навіть незначні затримки можуть впливати на синхронізацію та детермінованість обміну даними.

Логіка пошуку несправностей починається з аналізу зовнішнього прояву відмови, що показано у Таблиці 2. Кожен симптом співвідноситься з типовими технічними причинами та мінімально необхідним інструментом діагностики, що дозволяє швидко локалізувати проблему. Такий підхід формує у студентів інженерне мислення, орієнтоване на послідовний перехід від простих перевірок фізичного та каналного рівнів до аналізу трафіку і протокольної взаємодії.

Таблиця 8.2 – Типові відмови телекомунікаційних мереж

Симптом у мережі	Імовірна причина	Основний інструмент діагностики
Повна відсутність зв'язку з вузлом	Обрив кабелю, відключений порт, помилка фізичного підключення	LED-індикація портів, кабельний тестер, Ping
Періодичні розриви з'єднання	Нестабільний контакт, деградація кабелю, температурні впливи	Кабельний тестер, системна діагностика, журнали подій
Зростання кількості помилкових кадрів	Погана якість лінії, електромагнітні завади	Кабельний тестер, Ethernet statistics, Wireshark
Затримки та «підвисання» обміну даними	Перевантаження сегмента, ширококомовний трафік	Wireshark, Port Mirroring, RMON-статистика
Повна деградація роботи мережі	Мережева петля	Loop Detection, LED-індикація портів, журнали подій
Зниження пропускної здатності	Некоректна топологія, перевантаження портів	Ethernet statistics, Wireshark
Втрата пакетів у бездротовому сегменті	Завади, слабкий рівень сигналу	Signal Recorder, Spectrum Analyzer
Нестабільне WLAN-з'єднання в окремих зонах	Перекриття каналів точок доступу	Monitoring Overlapping Access Points
Поступове погіршення якості оптичного каналу	Деградація волокна, забруднення конекторів	FMP-діагностика, SFP-діагностика
Неможливість підключення нового пристрою	Помилки адресації або конфігурації	Ping, PRONETA
Наявність стороннього або неочікуваного трафіку	Помилки конфігурації або несанкціонований вузол	Port Mirroring, Wireshark
Формально активний зв'язок без корисного обміну	Протокольні помилки або несумісність налаштувань	Wireshark, системна діагностика

8.3 Діагностика фізичного і каналного рівня

Канальний рівень моделі OSI є критичним для промислових і корпоративних мереж, оскільки саме на цьому рівні формується фізичний і логічний зв'язок між мережевими пристроями. Від якості роботи каналного рівня залежить коректність передавання кадрів, стабільність з'єднань і передбачуваність часових характеристик мережі. Більшість практичних відмов у промислових мережах або безпосередньо виникають на цьому рівні, або проявляються через його деградацію.

Діагностика каналного рівня спрямована на виявлення проблем фізичного середовища передавання, портів комутуючих пристроїв, а також порушень у топології мережі. Фізичне середовище є найбільш вразливою складовою мережі. Для мідних ліній типовими проблемами є обриви, короткі замикання, асиметрія пар і погіршення контактів, тоді як для оптичних ліній – втрати потужності, забруднення конекторів і температурні впливи на передавальні модулі. Такі дефекти не завжди призводять до повної втрати зв'язку, але викликають зростання кількості помилкових кадрів і повторних передавань.

Діагностика фізичного середовища на каналному рівні виконується за допомогою вбудованих або зовнішніх кабельних тестерів, а також засобів контролю параметрів оптичних інтерфейсів. Основною метою є підтвердження цілісності каналу та оцінка запасу за параметрами передавання. Перевірка фізичного середовища дозволяє локалізувати значну частину мережових відмов ще до аналізу кадрів і пакетів, що робить її обов'язковим початковим етапом діагностики корпоративних і промислових мереж.

На каналному рівні важливу роль відіграє стан портів мережових пристроїв. Навіть за справного кабелю некоректна робота порту, узгодження швидкості або режиму дуплексу може призводити до нестабільної роботи з'єднання. У промислових мережах портова діагностика часто є першим кроком локалізації несправності. **Стан портів** оцінюється за допомогою апаратної індикації, вбудованих діагностичних повідомлень і статистичних лічильників. Аналіз таких параметрів дозволяє відрізнити фізичну несправність від помилки конфігурації або перевантаження.

Діагностика топології та мережових петель. Помилки топології є однією з найнебезпечніших причин відмов на каналному рівні. Наявність петель у комутованій мережі призводить до лавиноподібного зростання трафіку, різкого збільшення затримок і фактичного паралічу мережі. Особливістю таких відмов є те, що фізичні з'єднання залишаються справними, а проблема проявляється виключно через логіку каналного рівня.

Діагностика петель базується на аналізі поведінки портів, лічильників кадрів і спеціалізованих механізмів виявлення петель. Її завданням є швидка локалізація проблемного сегмента та запобігання поширенню аварійного трафіку.

8.3.1. Локальний рівень: LED-індикація портів і модулів

LED-індикація є найпростішим і водночас найшвидшим засобом локальної діагностики (рис. 8.2). Вона дозволяє отримати первинну інформацію про стан обладнання без використання програмних інструментів або підключення сервісного комп'ютера. Саме з аналізу індикації доцільно починати пошук несправностей у промисловій мережі.



Рисунок 8.2 – LED-індикація портів і модулів

За станом світлодіодів можна визначити наявність фізичного з'єднання, активність передавання даних, помилки порту або аварійний стан модуля. Важливою особливістю LED-діагностики є її придатність у ситуаціях, коли доступ до програмної діагностики обмежений або неможливий, наприклад під час аварійного простою чи відсутності мережевого доступу. Разом з тим індикація не дозволяє встановити точну причину проблеми, а лише вказує на напрям подальшої діагностики.

8.3.2. Локально-операційний рівень: Кабельний тестер

Кабельний тестер є базовим інструментом діагностики фізичного середовища передавання (рис.8.3). Його основне призначення полягає у виявленні дефектів мідних або оптичних ліній без демонтажу кабелю та без втручання в структуру мережі. У промислових умовах це особливо важливо, оскільки кабельні траси часто мають велику протяжність і складну прокладку.



Рисунок 8.3 – Кабельний тестер

Використання кабельного тестера дозволяє визначити обриви, короткі замикання, неправильне з'єднання пар або підвищене загасання сигналу. Для оптичних ліній додатково контролюються параметри передавальної та приймальної потужності. Практична цінність цього інструменту полягає в тому, що він дозволяє відокремити фізичні дефекти каналу від логічних і конфігураційних проблем ще до аналізу трафіку.

8.3.3. Операційний рівень: Wireshark

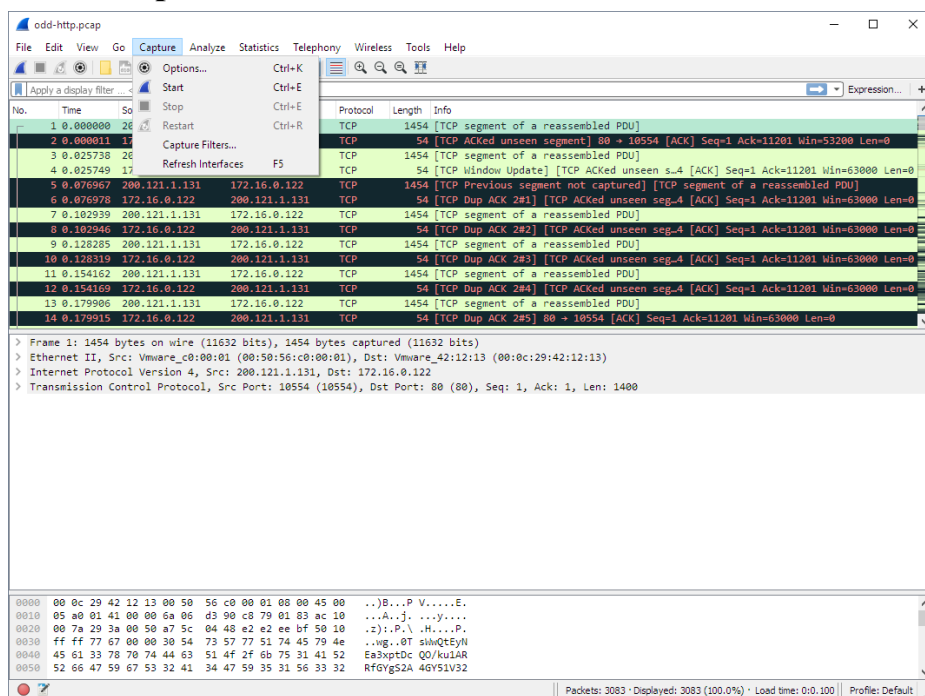


Рисунок 8.4 – Вигляд вікна Wireshark

Wireshark є універсальним інструментом операційної діагностики, який використовується для аналізу реального мережевого трафіку. Його застосування

дозволяє перейти від фізичного стану каналу до аналізу того, як саме відбувається обмін даними між вузлами мережі.

Особливістю Wireshark є можливість детального протокольного розбору кадрів і пакетів, що дозволяє виявляти перевантаження, затримки, повторні передавання, помилки протоколів і неочікувані джерела трафіку. Водночас цей інструмент потребує коректної підготовки точки захоплення трафіку, наприклад використання дзеркалювання портів.

Однак класичний підхід до аналізу трафіку має обмеження: захоплення даних здійснюється лише на локальному інтерфейсі комп'ютера, на якому запущено аналізатор. У комутованих мережах це означає, що інженер бачить лише трафік, адресований конкретному вузлу або спеціально перенаправлений на нього. Для подолання цього обмеження використовується механізм Remote Capture, який дозволяє виконувати захоплення трафіку безпосередньо на віддалених мережевих пристроях.

Remote Capture забезпечує можливість аналізу даних, що проходять через інтерфейси комутаторів або точок доступу, без фізичного підключення аналізатора до кожного сегмента мережі. Захоплений трафік передається на робочу станцію інженера, де він аналізується стандартними засобами Wireshark. Такий підхід є особливо корисним у розподілених телекомунікаційних системах або у випадках, коли доступ до мережевого обладнання фізично ускладнений.

8.3.4. Операційно-керівний рівень: Web Based Management

Web Based Management забезпечує віддалений доступ до діагностичних і експлуатаційних параметрів мережевих пристроїв через стандартний вебінтерфейс. Його ключовою особливістю є поєднання функцій моніторингу та базової конфігурації без необхідності встановлення спеціалізованого програмного забезпечення.

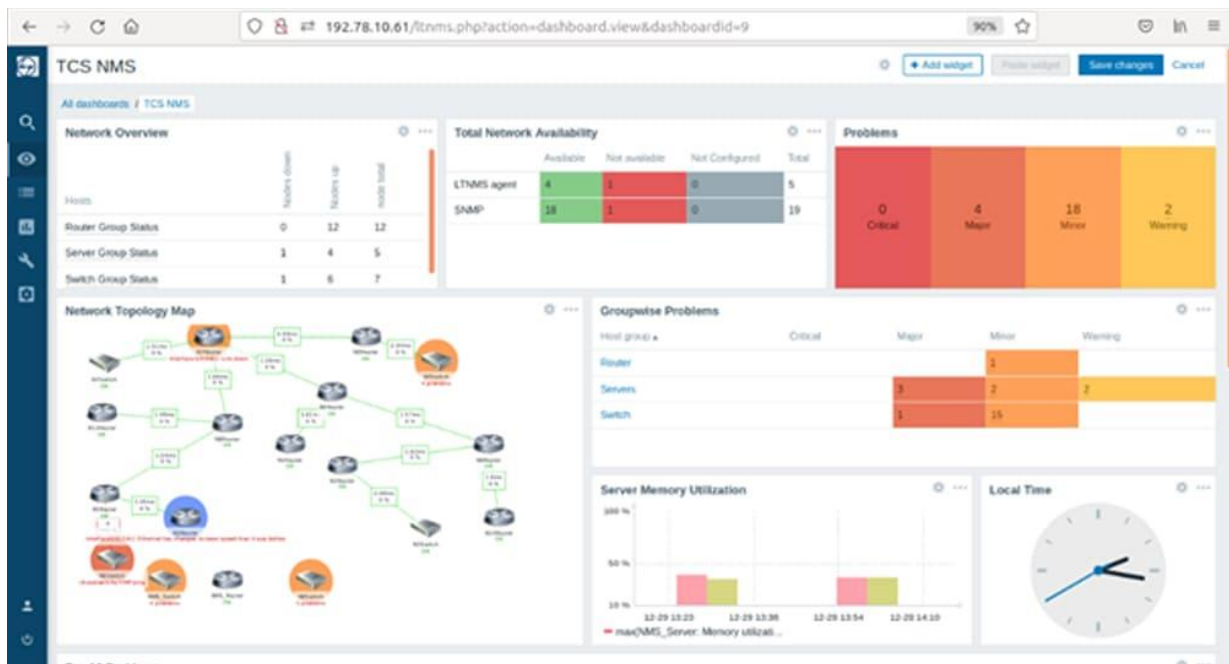


Рисунок 8.5 – Вигляд вікна Web Based Management

За допомогою Web Based Management можна аналізувати стан портів, переглядати журнали подій, контролювати навантаження та температурні режими обладнання. Такий підхід особливо зручний під час експлуатації розподілених промислових мереж, де фізичний доступ до пристроїв ускладнений. У контексті діагностики каналного рівня цей інструмент виступає містком між локальною індикацією та централізованим моніторингом.

8.3.5. Керівний рівень: SNMP

SNMP є типовим інструментом керівного рівня, який забезпечує централізований збір діагностичної інформації з великої кількості мережевих пристроїв. На відміну від локальних засобів, SNMP не використовується для пошуку одиничних фізичних дефектів, а орієнтований на узагальнений контроль стану мережі.

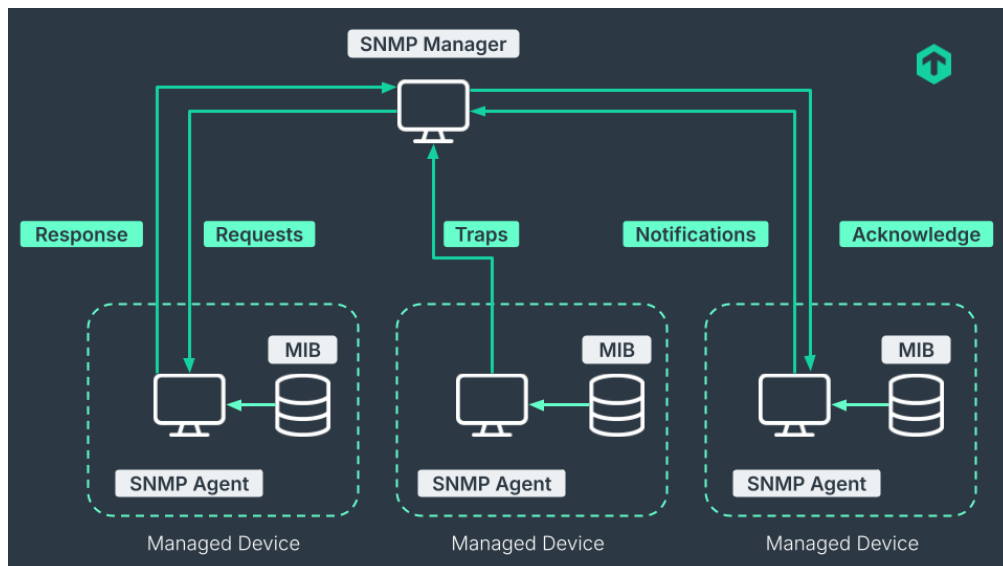
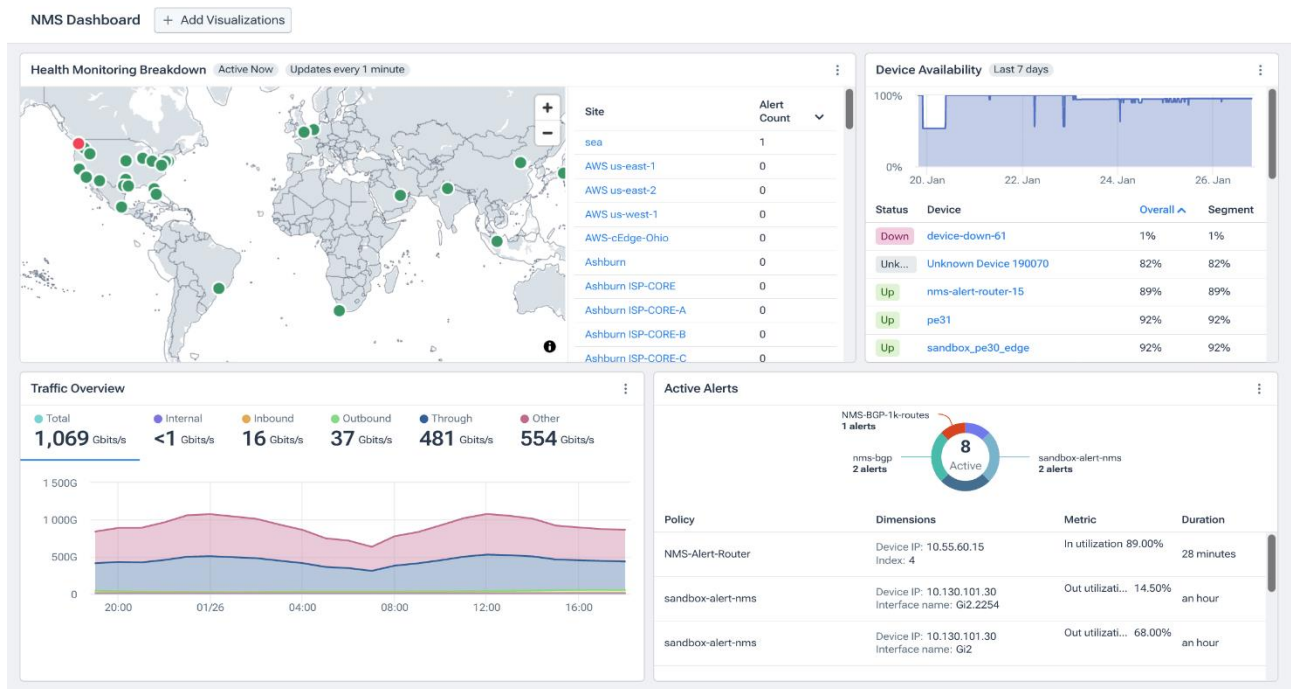


Рисунок 8. 6 – Структура SNMP

Особливістю використання SNMP є можливість автоматизованого моніторингу параметрів портів, навантаження, помилок і подій із подальшим формуванням повідомлень або статистичних звітів. У навчальному контексті SNMP дозволяє продемонструвати перехід від реактивної діагностики до системного спостереження та підтримки рішень на рівні експлуатації мережі.

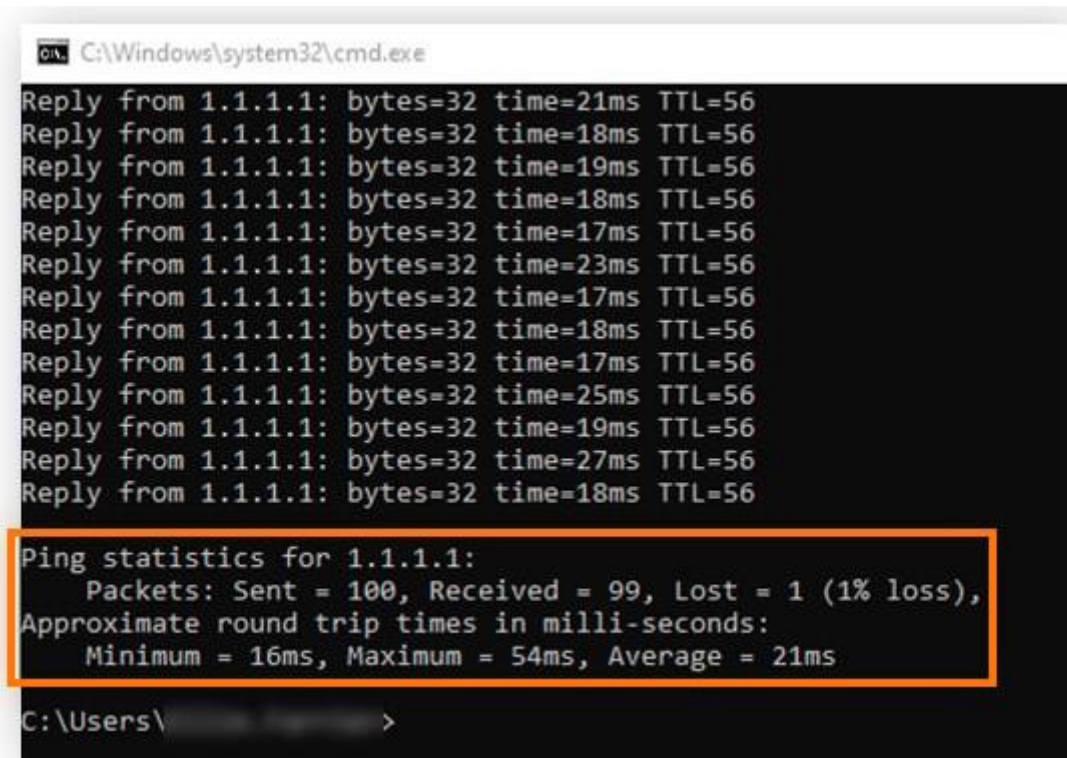
8.4 Діагностика мережевого рівня

Мережевий рівень моделі OSI відповідає за логічну адресацію, маршрутизацію та забезпечення доступності вузлів у межах корпоративної або промислової мережі. На відміну від канального рівня, де основна увага зосереджена на фізичному

середовищі та кадрах, діагностика мережевого рівня спрямована на аналіз логічної зв'язності, затримок передавання та втрат пакетів.

Для промислових мереж мережевий рівень є критичним з точки зору детермінованості обміну даними. Навіть за повністю справного фізичного каналу помилки адресації, маршрутизації або перевантаження окремих сегментів можуть призводити до нестабільної роботи систем керування. Тому діагностика мережевого рівня завжди виконується після підтвердження коректної роботи каналного рівня.

8.4.1. Ping – базова перевірка доступності вузлів



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=21ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=18ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=19ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=18ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=17ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=23ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=17ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=18ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=17ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=25ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=19ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=27ms TTL=56
Reply from 1.1.1.1: bytes=32 time=18ms TTL=56

Ping statistics for 1.1.1.1:
    Packets: Sent = 100, Received = 99, Lost = 1 (1% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 16ms, Maximum = 54ms, Average = 21ms

C:\Users\ >
```

Рисунок 8.7 – Вигляд вікна Ping

Ping є найпростішим і водночас базовим інструментом діагностики мережевого рівня. Його використання дозволяє перевірити логічну доступність мережевого вузла за IP-адресою та оцінити базові часові характеристики передавання пакетів. У промислових мережах Ping застосовується для первинної перевірки працездатності мережевого з'єднання між контролерами, операторськими станціями та сервісними вузлами.

Особливістю Ping є те, що він не аналізує структуру трафіку, а лише підтверджує факт досяжності вузла та фіксує затримку й втрати пакетів. Зростання часу відгуку або поява втрат часто вказують на перевантаження мережі, помилки маршрутизації або деградацію каналу. Водночас відсутність відповіді Ping не завжди означає фізичну несправність, оскільки ICMP-пакети можуть блокуватися налаштуваннями безпеки.

8.4.2. Traceroute – аналіз маршруту передавання пакетів

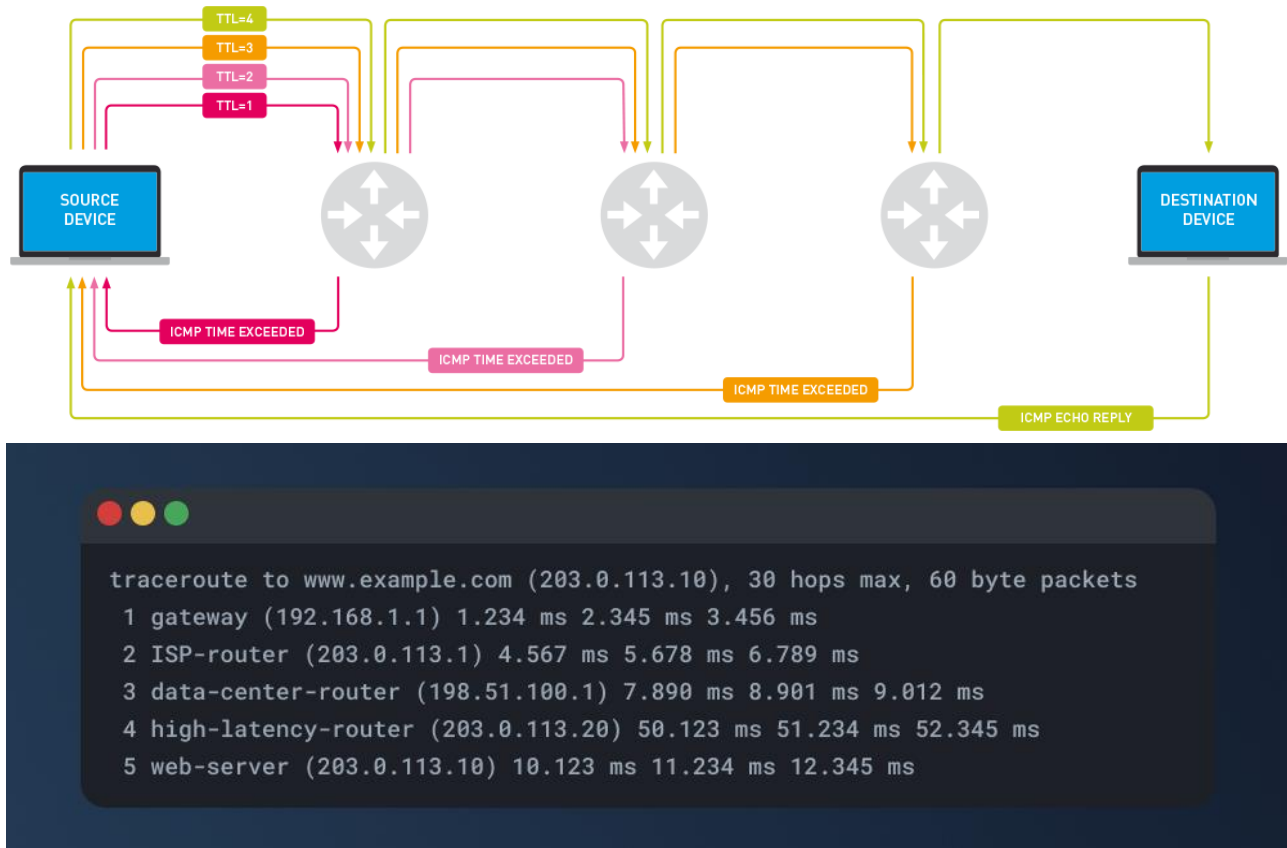


Рисунок 8.8 – Вигляд вікна Traceroute

Traceroute використовується для аналізу шляху, яким пакети проходять від джерела до призначення. Інструмент дозволяє визначити кількість проміжних вузлів, оцінити затримки на кожному етапі та виявити проблемні ділянки мережі. У корпоративних і промислових мережах Traceroute є особливо корисним у сегментах з ієрархічною або розподіленою топологією.

Практична цінність Traceroute полягає в можливості локалізувати ділянку, на якій виникає затримка або втрата пакетів. Якщо Ping підтверджує наявність проблеми, Traceroute дозволяє уточнити її місце в мережі. Це робить інструмент важливим елементом операційної діагностики мережевого рівня.

8.4.3. Аналіз IP-конфігурації вузлів

Коректність IP-адресації є обов'язковою умовою функціонування мережевого рівня. Помилки в налаштуваннях IP-адрес, масок підмереж або шлюзів за замовчуванням часто призводять до ситуацій, коли фізичне з'єднання наявне, але логічний обмін даними неможливий.

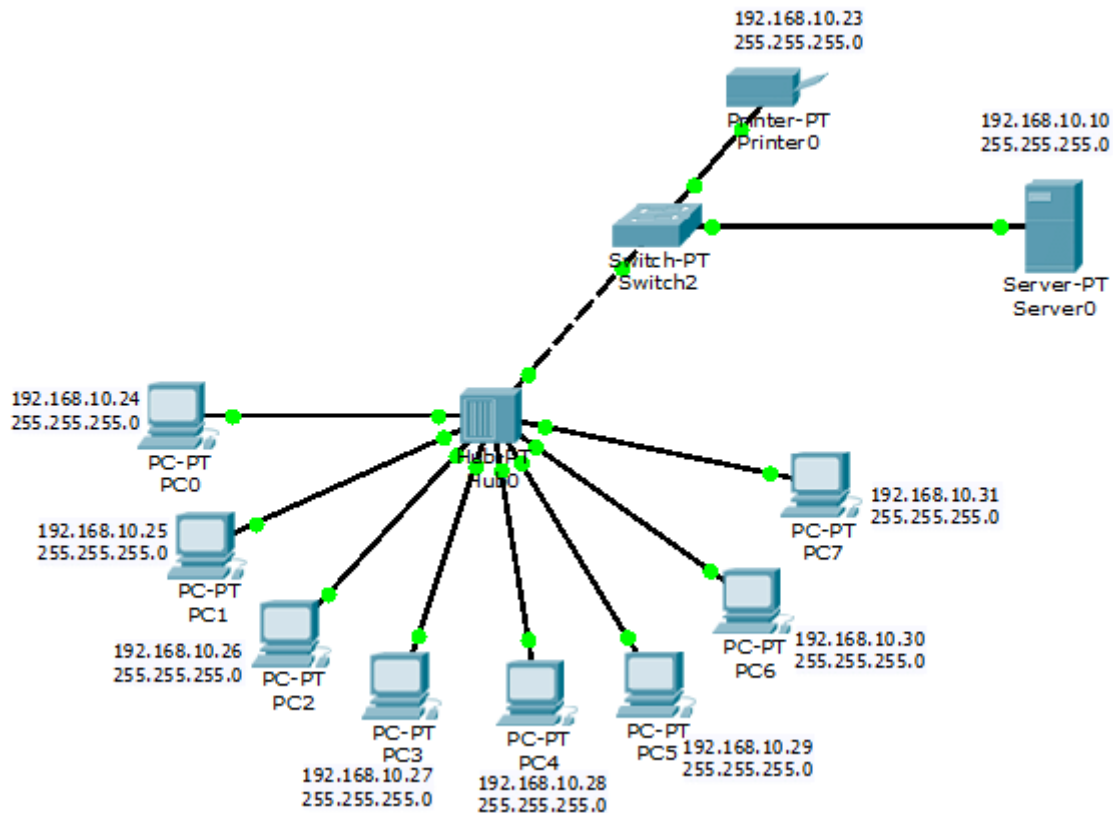


Рисунок 8.9 – Аналіз IP-конфігурації вузлів

Діагностика IP-конфігурації дозволяє перевірити відповідність параметрів вузла загальній структурі мережі. В промислових системах особливо важливо уникати конфліктів IP-адрес і некоректної сегментації, оскільки це може впливати на часові характеристики обміну даними. Аналіз IP-конфігурації часто поєднується з перевіркою доступності вузлів за допомогою Ping.

8.4.4. PRONETA – діагностика промислових мереж PROFINET

PRONETA є спеціалізованим інструментом для діагностики та пусконаладження мереж PROFINET. Він поєднує функції аналізу мережевого рівня з перевіркою конфігурації промислових пристроїв. Це робить його типовим прикладом інструменту, орієнтованого саме на промислові мережі, а не на універсальні IP-мережі.

Використання PRONETA дозволяє автоматично виявляти пристрої, перевіряти коректність адресації, ідентифікувати помилки конфігурації та оцінювати доступність вузлів. У навчальному контексті PRONETA є зручним засобом демонстрації відмінностей між загальними мережевими утилітами та спеціалізованими інструментами промислової автоматизації.

Діагностика мережевого рівня є логічним продовженням каналної діагностики та дозволяє перейти від перевірки фізичного середовища до аналізу логічної взаємодії між вузлами. Інструменти цього рівня орієнтовані на оцінку доступності, затримок і

маршрутів передавання даних, що є критичним для стабільної роботи корпоративних і промислових мереж.

8.5 Послідовність діагностики OSI

Послідовність діагностики відповідно до моделі OSI є базовим методичним принципом пошуку несправностей у корпоративних і промислових мережах. Її суть полягає у поетапному переході від нижчих рівнів до вищих або, залежно від характеру симптомів, у контрольованому русі від логічного рівня до фізичного з обов'язковою верифікацією кожного кроку (рис. 8.10). Такий підхід дозволяє уникнути помилкових висновків і суттєво скоротити час локалізації відмов.

У практиці промислової автоматизації основним є принцип «від фізики до логіки». Це означає, що аналіз доступності вузлів, маршрутизації або трафіку має сенс лише після підтвердження коректної роботи фізичного та канального рівнів. Перехід до мережевого рівня без перевірки кабелів, портів і топології часто призводить до хибної інтерпретації результатів діагностики. Послідовність дій зазвичай починається з оцінювання фізичного середовища та стану портів, далі виконується діагностика канального рівня з аналізом з'єднань і топології, і лише після цього здійснюється перевірка мережевого рівня – логічної доступності вузлів, маршрутів і затримок передавання.

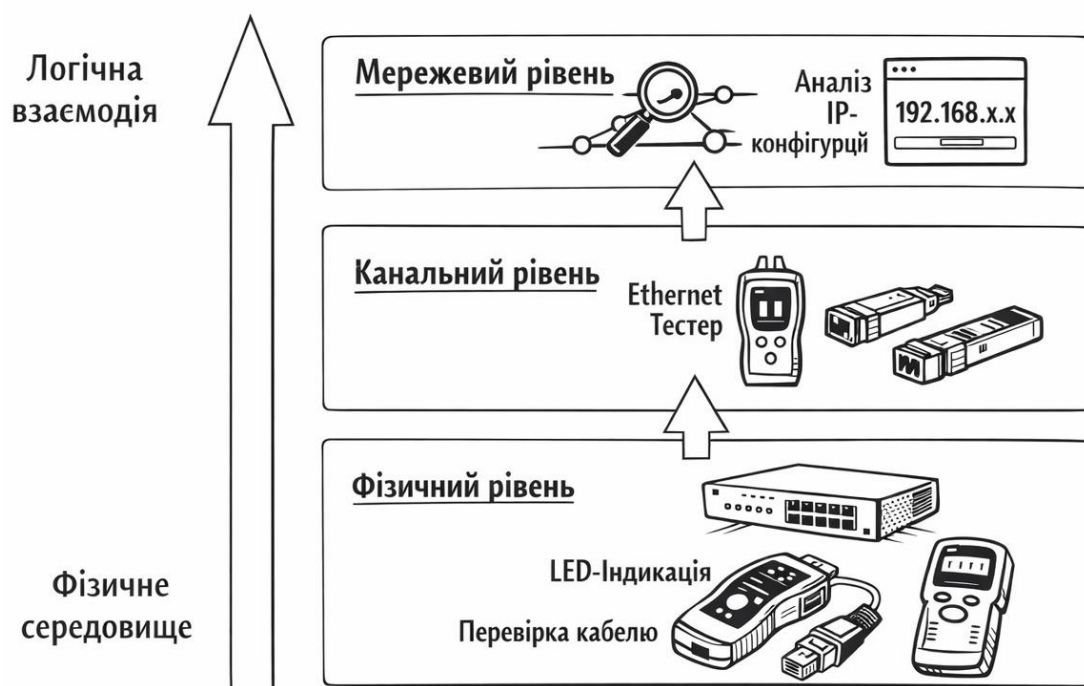


Рисунок 8.10 – Послідовність діагностики OSI

Критично важливі помилки при діагностиці мереж. Однією з найпоширеніших помилок є ігнорування фізичного рівня та спроба одразу

аналізувати мережеві або протокольні аспекти. У такій ситуації логічні інструменти лише фіксують симптоми, але не дозволяють виявити першопричину проблеми, наприклад деградацію кабелю або нестабільність оптичного каналу.

Ще однією критичною помилкою є одноразова перевірка без аналізу динаміки параметрів. Багато відмов у промислових мережах мають інтермітуючий характер і проявляються лише за певних умов навантаження або температури. Оцінка стану мережі лише в один момент часу може створити хибне уявлення про її працездатність.

Поширеною є також помилкова інтерпретація результатів Ping або Traceroute. Відсутність відповіді не завжди означає фізичну несправність, а наявність відповіді – коректну роботу мережі. ICMP-пакети можуть фільтруватися, а затримки можуть бути наслідком пріоритетів трафіку, а не відмови обладнання.

Окрему небезпеку становить надмірна довіра до одного інструменту діагностики. Використання лише аналізатора трафіку або лише системи моніторингу без підтвердження результатів іншими методами знижує достовірність висновків.

Оцінювання результатів діагностики повинно базуватися не на абсолютних значеннях параметрів, а на їх відповідності допустимим межам і динаміці змін. У промислових мережах особливо важливо звертати увагу на поступове погіршення характеристик, навіть якщо вони ще перебувають у допустимих межах.

Результати діагностики мають використовуватися не лише для усунення поточних відмов, а й для планування профілактичних заходів, таких як заміна кабельних ділянок, оптимізація топології або перерозподіл навантаження. Таким чином, діагностика стає інструментом підтримки експлуатаційних рішень, а не лише засобом аварійного реагування.

Тема 9. Моніторинг і діагностика в експлуатації

Моніторинг і діагностика в експлуатації: терміни, структура та рівні. Архітектура системи експлуатаційного моніторингу та діагностики мережі. Централізоване журналювання та подієва діагностика. Протокольний моніторинг мережі. Централізоване керування та моніторинг мереж

9.1 Моніторинг і діагностика в експлуатації: терміни, структура та рівні

Моніторинг у процесі експлуатації виконує функцію інформаційної основи для прийняття рішень щодо технічного обслуговування, оптимізації конфігурації та модернізації мережі. На підставі моніторингових даних визначаються критичні ділянки інфраструктури, оцінюється доцільність заміни обладнання або зміни топології та плануються профілактичні роботи.

Моніторинг мережі – це безперервний або періодичний процес збирання, фіксації та аналізу параметрів роботи мережі з метою оцінювання її поточного стану та прогнозування можливих відмов у процесі експлуатації. На відміну від локальної діагностики, моніторинг не орієнтований на разовий пошук несправності, а забезпечує систематичне спостереження за мережею в часі.

Діагностика в експлуатації – це сукупність методів і засобів аналізу зібраних моніторингових даних для виявлення відхилень від нормального режиму роботи, встановлення причин таких відхилень та підтримки рішень щодо обслуговування і модернізації мережі.

Стан мережі – узагальнена характеристика працездатності мережевої інфраструктури, що визначається сукупністю параметрів доступності, якості передавання даних і стабільності роботи в часі.

Деградація мережі – поступове погіршення параметрів роботи мережі, яке не завжди призводить до негайної відмови, але знижує її надійність і створює передумови для аварійних ситуацій.

Моніторинг у процесі експлуатації будується за ієрархічним принципом і охоплює кілька взаємопов'язаних рівнів. На нижчих рівнях формується первинна інформація про стан обладнання та з'єднань, тоді як на вищих рівнях відбувається її узагальнення, кореляція та інтерпретація.

Локальний рівень моніторингу забезпечує спостереження за параметрами окремих пристроїв і портів, такими як стан інтерфейсів, помилки передавання або апаратні попередження. Операційний рівень орієнтований на контроль функціонування мережевих сегментів, зокрема доступність вузлів, затримки та

втрати пакетів. Керівний рівень виконує інтеграцію даних з усієї мережі та використовується для оцінювання загального стану інфраструктури і підтримки експлуатаційних рішень.

Такий поділ дозволяє розмежувати задачі оперативного реагування і стратегічного планування, що є особливо важливим для великих корпоративних і промислових мереж.

Оцінювання стану мережі в експлуатації базується не на окремих вимірюваннях, а на аналізі сукупності параметрів у часовій динаміці. Метою цього процесу є не лише виявлення поточних проблем, а й прогнозування їх розвитку та запобігання відмовам.

Параметри, що свідчать про деградацію мережі

Про деградацію мережі свідчать параметри, які демонструють стійку тенденцію до погіршення, навіть якщо їх абсолютні значення ще не перевищують допустимих меж. До таких параметрів належать зростання затримки передавання пакетів, збільшення варіації затримки, поява регулярних втрат пакетів, зростання кількості помилок на портах та підвищене навантаження на окремі сегменти мережі.

Особливо небезпечними є ситуації, коли деградація проявляється нерівномірно – наприклад, лише в певні часові інтервали або за пікового навантаження. У таких випадках мережа може тривалий час вважатися працездатною, але фактично перебувати в нестійкому режимі.

Одним із ключових завдань експлуатаційної діагностики є відрізнення випадкових подій від системних проблем. **Випадкова подія** зазвичай має одноразовий характер, не повторюється в часі та не супроводжується стійкими змінами параметрів мережі. Прикладом може бути короточасний сплеск затримки або поодинокий втрачений пакет.

Системна проблема, навпаки, проявляється у вигляді повторюваних або наростаючих відхилень. Вона може супроводжуватися кореляцією кількох параметрів, наприклад одночасним зростанням затримки, втрат пакетів і кількості помилок на портах. Саме така кореляція є ключовою ознакою проблем, що потребують експлуатаційного втручання.

Важливою ознакою системної проблеми є її прив'язка до конкретних умов: часу доби, навантаження мережі або режиму роботи обладнання. Аналіз цих залежностей дозволяє перейти від реагування на симптоми до усунення першопричин.

9.2 Архітектура системи експлуатаційного моніторингу та діагностики мережі

Узагальнена архітектура системи експлуатаційного моніторингу та діагностики мережі базується на централізованому збиранні діагностичної інформації з мережевих пристроїв і кінцевих вузлів. Джерелами даних є події повідомлення, журнали системних подій і результати протокольного моніторингу, які передаються до спеціалізованих серверів моніторингу та журналювання. Зібрана інформація зберігається в базах даних і використовується для аналізу поточного стану мережі, виявлення відхилень від нормального режиму роботи та встановлення причин збоїв. Результати аналізу подаються у вигляді сповіщень, звітів і візуалізацій, доступних через робочі станції та веб-інтерфейси, що забезпечує підтримку експлуатаційних рішень і перехід від реагування на окремі події до системного керування надійністю мережі.

Експлуатаційний моніторинг телекомунікаційної мережі реалізується як послідовний процес, у якому кожен етап використовує результати попереднього та уточнює уявлення про стан мережі (рис. 9.1).



Рисунок 9.1 – Узагальнена структура системи експлуатаційного моніторингу

Початковим етапом є **протокольні методи діагностики**, які забезпечують базову оцінку доступності та працездатності мережі. За допомогою стандартних протоколів виконується контроль стану вузлів, інтерфейсів і основних параметрів роботи. Цей рівень формує первинне уявлення про те, чи функціонує мережа в цілому та які її сегменти потребують детальнішого аналізу.

Далі виконується **збір і централізація діагностичних даних**. На цьому етапі подієві повідомлення, журнали системних подій і результати протокольного опитування передаються до централізованих серверів моніторингу та журналювання. Централізація даних дозволяє перейти від ізольованого аналізу окремих пристроїв до комплексного розгляду стану мережі та створює основу для кореляції подій.

Наступним етапом є **аналіз трафіку**, який застосовується для поглибленого дослідження поведінки мережі в робочому режимі. Аналіз трафіку дозволяє виявити перевантаження, аномальні потоки даних, повторні передавання та неефективне використання ресурсів. На цьому рівні уточнюється, яким чином логічні та фізичні проблеми проявляються у реальному обміні даними.

У разі виявлення відхилень виконується **інструментальна перевірка та конфігурація** мереж. Цей етап передбачає використання спеціалізованих інструментів для перевірки фізичного середовища, параметрів портів і налаштувань мережевих пристроїв. За потреби здійснюється коригування конфігурації з метою усунення виявлених проблем або оптимізації роботи мережі.

Завершальним етапом є **централізоване керування та моніторинг мереж**, у межах якого всі зібрані дані узагальнюються, візуалізуються та використовуються для підтримки експлуатаційних рішень. На цьому рівні формується цілісна картина стану мережі, забезпечується довготривалий контроль параметрів і реалізується перехід від реактивного реагування на відмови до проактивного керування надійністю інфраструктури.

9.3 Протокольний моніторинг мережі

У процесі експлуатації телекомунікаційної мережі важливо не лише фіксувати окремі події, а й мати **узагальнену картину її стану**. Саме цю задачу вирішує протокольний моніторинг – підхід, за якого інформація про стан мережі отримується шляхом стандартизованого обміну службовими повідомленнями між системою моніторингу та мережевими пристроями.

На відміну від подієвої діагностики, яка реагує на вже зафіксовані події, протокольний моніторинг орієнтований на **регулярне вимірювання параметрів** та аналіз їх змін у часі. Це дозволяє оцінювати працездатність мережі в цілому, виявляти тенденції деградації та прогнозувати можливі відмови.

Протокольний моніторинг займає проміжне положення між локальною діагностикою та повноцінними системами керування мережею. Він забезпечує централізований доступ до параметрів великої кількості пристроїв без необхідності прямого аналізу трафіку користувачів.

Основне призначення цього підходу полягає в отриманні відповідей на запитання:

чи доступні вузли мережі, у якому режимі працюють їх інтерфейси, як змінюється навантаження та кількість помилок у часі. Саме ці питання є ключовими для оцінювання експлуатаційного стану мережі.

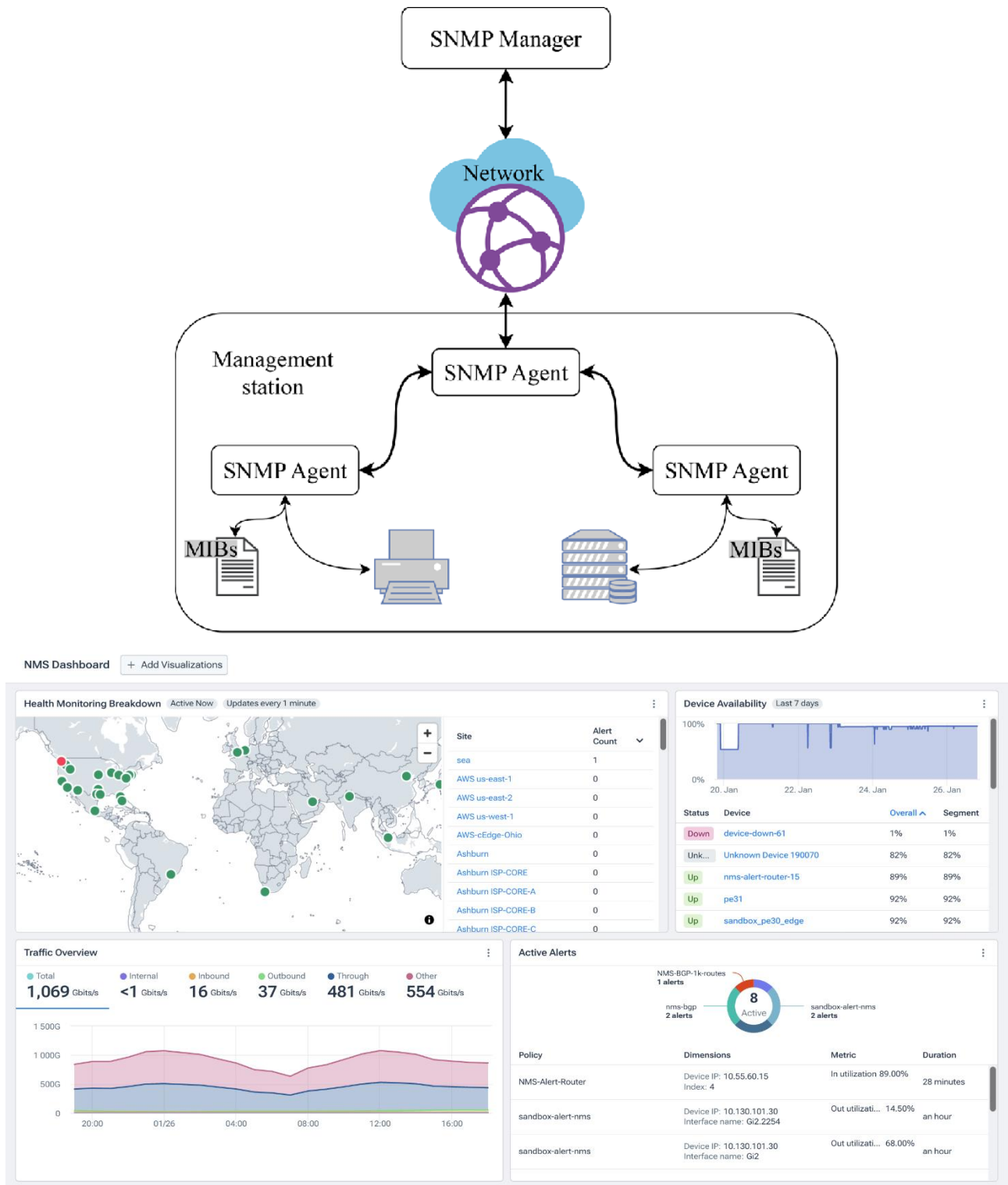


Рисунок 9.2 – SNMP як основа протокольного моніторингу

SNMP є базовим протоколом протокольного моніторингу в корпоративних і промислових мережах (рис.9.2). Його використання ґрунтується на моделі «керуюча система – керований пристрій», у межах якої система моніторингу періодично запитує параметри стану обладнання або отримує повідомлення про події.

З технічної точки зору SNMP дозволяє зчитувати значення лічильників, стан інтерфейсів, параметри навантаження та помилок. Для студентів важливо розуміти, що SNMP не передає реальний трафік мережі, а працює з узагальненими показниками, які вже сформовані на пристрої. Саме тому протокольний моніторинг є масштабованим і придатним для великих мереж.

Періодичний моніторинг і події повідомлення

Протокольний моніторинг може реалізовуватися у двох взаємодоповнювальних режимах. Перший – **періодичне опитування**, за якого система моніторингу через задані інтервали часу зчитує параметри пристроїв. Другий – **події повідомлення**, які надсилаються пристроями у разі виникнення визначених умов.

Періодичний моніторинг дозволяє аналізувати динаміку параметрів і виявляти повільну деградацію, тоді як події повідомлення забезпечують швидку реакцію на критичні ситуації. Їх поєднання є характерною ознакою сучасних систем експлуатаційного моніторингу.

RMON розширює можливості протокольного моніторингу за рахунок накопичення статистичних даних безпосередньо в мережевих пристроях (рис. 9.3). Це дозволяє аналізувати трафік і навантаження не лише в поточний момент часу, а й за попередні періоди.

Для експлуатаційної діагностики RMON є особливо корисним, оскільки дає змогу виявляти періодичні перевантаження, оцінювати використання ресурсів і порівнювати режими роботи мережі в різні часові інтервали. У навчальному контексті цей інструмент добре ілюструє перехід від миттєвих вимірювань до аналізу історичних даних.

Типові параметри протокольного моніторингу. У межах протокольного моніторингу контролюються параметри, які відображають загальний стан мережі та її елементів. До них належать доступність пристроїв, стан мережевих інтерфейсів, навантаження каналів, кількість помилок і повторних передавань, а також статистика трафіку за типами кадрів і пакетів.

Важливо підкреслити, що ці параметри мають найбільшу цінність у часовій динаміці. Окреме вимірювання лише фіксує поточний стан, тоді як послідовність вимірювань дозволяє виявити тенденції та закономірності.

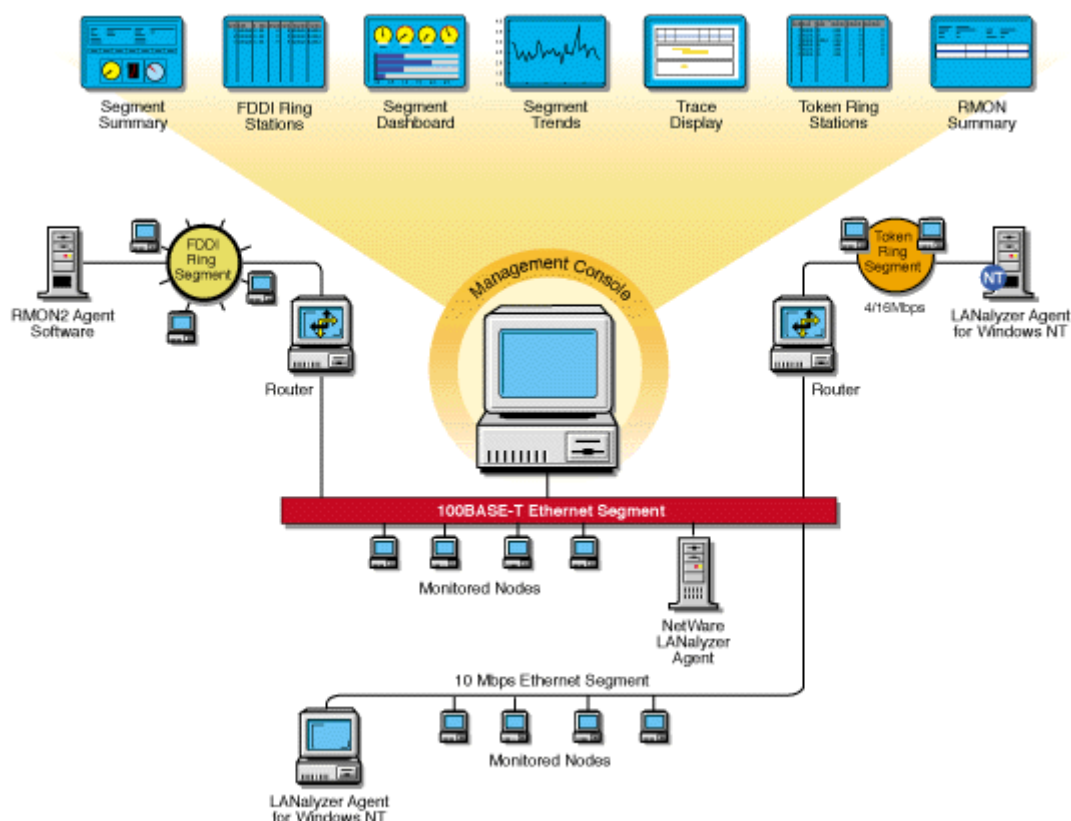


Рисунок 9.3 – RMON як інструмент поглибленого аналізу

9.4 Збір і централізація діагностичних даних

У процесі експлуатації телекомунікаційної мережі більшість відмов і порушень не проявляються як миттєві аварії, а формуються у вигляді послідовності подій і попереджувальних ознак. Саме тому ключову роль відіграє централізоване **журналювання** – механізм накопичення подієвої інформації з різних елементів мережі з можливістю її подальшого аналізу.

Подієва діагностика базується на аналізі повідомлень про зміни стану мережі, які генеруються пристроями автоматично. На відміну від періодичного моніторингу параметрів, подієва діагностика фіксує *факт* виникнення події, що дозволяє точно відтворити хронологію розвитку проблеми. Однією з головних задач подієвої

діагностики є **кореляція подій** – встановлення зв'язків між повідомленнями, що надходять від різних елементів мережі. Наприклад, короткочасна втрата зв'язку з кількома вузлами може бути наслідком однієї події на рівні комутатора або магістрального каналу.

Кореляційний аналіз дозволяє:

- зменшити кількість хибних тривог;
- відрізнити локальну подію від системної проблеми;
- визначити першопричину відмови.

Централізоване журналювання забезпечує збирання повідомлень від мережевих пристроїв, серверів і систем керування в єдине сховище. Це дозволяє перейти від локального перегляду журналів окремих пристроїв до комплексного аналізу стану всієї мережі.

Основна цінність такого підходу полягає у можливості:

- відтворення послідовності подій перед відмовою;
- кореляції подій з різних джерел;
- відокремлення первинної причини від вторинних наслідків;
- аналізу повторюваних сценаріїв збоїв.

Події, які надходять у систему журналювання, можуть мати різну природу. Частина з них пов'язана з апаратним станом обладнання, наприклад перезавантаження пристрою, відмова порту або перегрів. Інша частина стосується мережевих процесів: розрив з'єднання, зміна стану інтерфейсу, виявлення петлі або помилки адресації. Окрему категорію становлять системні та експлуатаційні події, зокрема зміни конфігурації або спроби несанкціонованого доступу.

Важливо, що не кожна подія є аварійною. Значна частина повідомлень має інформаційний або попереджувальний характер і використовується для аналізу тенденцій та прогнозування деградації мережі.

Syslog є одним з найпоширеніших механізмів передавання журналів подій у корпоративних і промислових мережах (рис. 9.4). Його ключовою особливістю є простота та універсальність: більшість мережевих пристроїв і серверів підтримують надсилання Syslog-повідомлень без додаткового програмного забезпечення.

Повідомлення Syslog містять інформацію про тип події, її важливість і час виникнення. Централізований Syslog-сервер акумулює ці повідомлення, забезпечуючи їх збереження та пошук. У навчальному контексті Syslog дозволяє наочно показати, як розрізняються інформаційні, попереджувальні та аварійні події, і як за їх сукупністю можна зробити висновок про стан мережі.

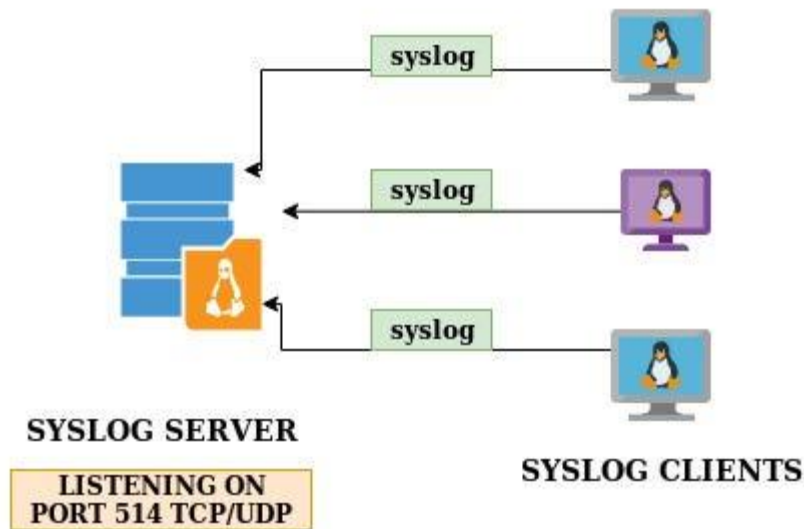


Рисунок 9.4 – Syslog як базовий механізм централізованого журналювання

У складних телекомунікаційних і автоматизованих системах ефективна діагностика неможлива без централізованого збору та узагальнення діагностичних даних. Окремі повідомлення про стан пристроїв, помилки або події, отримані на локальному чи операційному рівнях, не дають повної картини роботи системи в цілому. Саме тому застосовуються спеціалізовані програмні засоби, призначені для комплексного аналізу технічного стану мережі та обладнання.

SIMATIC Assessment Suite є прикладом такого інструмента і використовується для збирання, структурованого подання та аналізу діагностичної і системної інформації з різних компонентів телекомунікаційної інфраструктури. Його основне призначення полягає не в оперативному реагуванні на одиничні відмови, а в отриманні цілісного уявлення про стан системи за певний період часу. Це дозволяє виявляти приховані проблеми, які не проявляються у вигляді миттєвих аварій, але поступово впливають на надійність і доступність мережі.

Централізований підхід до збору даних передбачає об'єднання інформації з контролерів, мережевого обладнання, каналів зв'язку та системних журналів. Зібрані дані можуть містити відомості про помилки, попередження, зміни конфігурації, параметри навантаження та експлуатаційні характеристики. Їх аналіз у межах одного інструмента спрощує пошук взаємозв'язків між подіями та дозволяє переходити від фрагментарної діагностики до системного аналізу причин несправностей.

Важливою особливістю таких засобів є можливість оцінювання технічного стану системи без безпосереднього втручання в її роботу. Збір даних здійснюється у фоновому режимі, що не порушує процес передавання даних і не впливає на функціонування телекомунікаційної мережі. Це робить централізовану діагностику придатною для використання в системах з безперервним режимом роботи.

9.5 Аналіз трафіку

Аналіз трафіку є одним із ключових інструментів експлуатаційної діагностики телекомунікаційних мереж. Його призначення полягає у вивченні реального обміну даними між вузлами мережі з метою оцінювання навантаження, виявлення аномалій, перевантажень і порушень нормального режиму роботи. На відміну від протокольного моніторингу, який оперує узагальненими параметрами, аналіз трафіку дозволяє безпосередньо спостерігати структуру потоків даних і характер взаємодії між мережевими пристроями.

Захоплення пакетів є базовим етапом аналізу трафіку. Воно полягає у копіюванні мережових кадрів або пакетів для подальшого аналізу без впливу на основний процес передавання даних. У комутованих мережах захоплення трафіку зазвичай здійснюється через механізм дзеркалювання портів або використання спеціалізованих точок доступу до трафіку.

Важливо розуміти, що захоплюється не весь трафік мережі, а лише той, який проходить через обрану точку спостереження. Тому правильний вибір місця захоплення є критичним для достовірності результатів аналізу. У промислових мережах особливу увагу приділяють мінімізації впливу захоплення на часові характеристики обміну даними.

Обсяг захопленого трафіку в реальних мережах може бути надмірним для прямого аналізу. Тому наступним етапом є **фільтрація** – відбір лише тих пакетів або потоків, які мають діагностичну цінність. Фільтрація може виконуватися за адресами, типами протоколів, напрямком передавання або часовими інтервалами.

Одним із основних завдань аналізу трафіку є **виявлення перевантажених сегментів** і вузьких місць. Перевантаження проявляється у вигляді зростання обсягу трафіку, черг пакетів, повторних передавань і збільшення затримок. Аналіз трафіку дозволяє встановити, які вузли або канали є джерелами надмірного навантаження та як це впливає на інші елементи мережі.

У промислових мережах перевантаження можуть бути пов'язані не лише з кількістю даних, а й з порушенням пріоритетів трафіку або некоректною взаємодією службових і прикладних потоків. Тому аналіз трафіку використовується для перевірки відповідності фактичного режиму роботи запроєктованим параметрам.

Аналіз трафіку дозволяє виявляти нетипові або небажані потоки даних, які можуть свідчити про помилки конфігурації, збої в роботі обладнання або несанкціоновану активність. **Аномалії** часто проявляються як поява нових джерел трафіку, зміна напрямку обміну або порушення звичної часової структури потоків.

Основними інструментами аналізу трафіку є **програмні аналізатори**, які дозволяють захоплювати, фільтрувати та візуалізувати мережеві потоки. Вони надають інженеру можливість працювати як з окремими пакетами, так і з агрегованими статистичними показниками. У промислових мережах аналіз трафіку часто поєднується з вбудованими засобами комутаторів і систем моніторингу, що забезпечує узгодженість результатів.

9.6. Інструментальна перевірка та конфігурація мереж PROFINET (PRONETA)

Під час введення в експлуатацію та обслуговування телекомунікаційних мереж особливу увагу приділяють перевірці коректності конфігурації та фактичного стану мережевих з'єднань. Для мереж **PROFINET** це завдання вирішується за допомогою спеціалізованих інструментів інструментальної перевірки, одним із яких є PRONETA. Його призначення полягає у швидкій і наочній діагностиці мережі без необхідності повного запуску системи керування або активного обміну прикладними даними.

PRONETA використовується для виявлення та аналізу пристроїв PROFINET у мережі, перевірки їхньої доступності, ідентифікації та параметрів конфігурації. Інструмент дозволяє визначити, які пристрої фізично присутні в мережі, які імена та адреси їм призначені, а також чи відповідають ці параметри проєктній конфігурації. Такий підхід є особливо корисним на етапі пусконаладжувальних робіт, коли помилки адресації або ідентифікації є однією з найпоширеніших причин відсутності зв'язку.

Важливою особливістю PRONETA є можливість перевірки мережі без активного контролера. Це дозволяє виконувати інструментальну діагностику ще до запуску прикладної програми або у випадках, коли контролер тимчасово недоступний. У навчальному контексті це наочно демонструє студентам, що коректність функціонування телекомунікаційної мережі значною мірою залежить від правильності її базових параметрів, незалежно від логіки керування.

Окрім перевірки, PRONETA підтримує базову конфігурацію мережевих параметрів, зокрема призначення імен пристроїв і контроль відповідності топології. Це дозволяє швидко усувати типові помилки, пов'язані з дублюванням імен, невідповідністю конфігурації або помилковим підключенням пристроїв. Таким чином, інструмент поєднує функції діагностики та налаштування, що є характерною рисою сучасних засобів інструментального вимірювання в телекомунікаціях.

З точки зору ієрархії діагностики PRONETA належить до операційного рівня, оскільки забезпечує аналіз мережі як сукупності взаємодіючих вузлів, не

заглиблюючись у детальний протокольний аналіз трафіку. Він дозволяє швидко підтвердити працездатність мережевої інфраструктури та локалізувати проблеми, які унеможливають нормальний обмін даними.

9.7. Централізоване керування та моніторинг мереж (SINEC NMS)

У великих телекомунікаційних і промислових мережах, що включають значну кількість комутаторів, точок доступу та мережевих сегментів, локальні й операційні засоби діагностики стають недостатніми для ефективного контролю. У таких умовах необхідним є централізоване керування та моніторинг мережі, які реалізуються за допомогою систем класу Network Management System (NMS). Одним із прикладів таких систем є SINEC NMS.

SINEC NMS призначена для централізованого спостереження за станом телекомунікаційної мережі як єдиного цілого. Вона забезпечує збір діагностичної та експлуатаційної інформації з мережевого обладнання, її узагальнення та подання у вигляді наочних структурованих подань. Завдяки цьому інженер отримує можливість контролювати стан великої кількості пристроїв з одного робочого місця, без необхідності підключення до кожного з них окремо.

Ключовою особливістю централізованого моніторингу є перехід від аналізу окремих подій до спостереження за загальним станом мережі. SINEC NMS дозволяє відстежувати доступність пристроїв, стан з'єднань, зміни топології та виникнення аварійних ситуацій у режимі реального часу. Події, що надходять з різних сегментів мережі, можуть бути зведені в єдиний журнал, що значно спрощує аналіз причин збоїв і взаємозв'язків між ними.

Окрім моніторингу, системи централізованого керування виконують керівну та аналітичну функції. Вони дозволяють здійснювати базові керуючі дії, контролювати відповідність поточного стану мережі заданим параметрам, а також накопичувати статистичні дані для довгострокового аналізу. Такий підхід є особливо важливим для оцінювання надійності, планування технічного обслуговування та прийняття рішень щодо розвитку телекомунікаційної інфраструктури.

З погляду ієрархії діагностики SINEC NMS належить до керівного рівня, оскільки працює з узагальненою інформацією та орієнтована на системний контроль. Вона не замінює вбудовані або зовнішні інструменти діагностики, а доповнює їх, забезпечуючи цілісне бачення мережі та дозволяючи своєчасно виявляти тенденції, що можуть призвести до порушення її працездатності.

Список джерел

Тема 1. Вступ до інструментальних вимірювань у телекомунікаціях

1. Morris A. S., Langari R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 3rd ed. Academic Press, 2020.
2. Dunsmore J. P. Handbook of Microwave Component Measurements: With Advanced VNA Techniques. 2nd ed. Wiley, 2020. 840 p. DOI: 10.1002/9781119477167.
3. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM GUM-1:2023. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Part 1: Introduction. BIPM, 2023. DOI: 10.59161/JCGMGUM-1-2023.
4. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM GUM-6:2020. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Part 6: Developing and Using Measurement Models. BIPM, 2020. DOI: 10.59161/JCGMGUM-6-2020.
5. Bureau International des Poids et Mesures. The International System of Units (SI). 9th ed., 2019; updated version 4.01, June 2026. BIPM, 2026. DOI: 10.59161/AUEZ1291.
6. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. ISO/IEC, 2017.
7. Hatab Z., Gadringer M. E., Bösch W. Propagation of Linear Uncertainties Through Multiline Thru-Reflect-Line Calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. Article 1007409. P. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2023.3296123.

Тема 2. Інструментальні вимірювання у волоконно-оптичних лініях зв'язку

1. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. 5th ed. Wiley, 2021. 528 p. DOI: 10.1002/9781119737391.
2. ITU-T G.650.1 (01/2024). Definitions and Test Methods for Linear, Deterministic Attributes of Single-Mode Fibre and Cable. ITU, 2024.
3. ITU-T G.650.3 (08/2017). Test Methods for Installed Single-Mode Optical Fibre Cable Links. ITU, 2017.
4. ITU-T G.652 (08/2024). Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable. ITU, 2024.
5. ITU-T G.657 (08/2024). Characteristics of a Bending-Loss Insensitive Single-Mode Optical Fibre and Cable. ITU, 2024.
6. IEC 61280-4-2:2024. Fibre-Optic Communication Subsystem Test Procedures – Part 4-2: Installed Cabling Plant – Single-Mode Attenuation and Optical Return Loss Measurements. IEC, 2024.

7. IEC 61280-4-1:2019+AMD1:2021 CSV. Fibre-Optic Communication Subsystem Test Procedures – Part 4-1: Installed Cabling Plant – Multimode Attenuation Measurement. Consolidated version. IEC, 2021.

8. IEC 61280-4-3:2022. Fibre Optic Communication Subsystem Test Procedures – Part 4-3: Installed Passive Optical Networks – Attenuation and Optical Return Loss Measurements. IEC, 2022.

9. IEC 61300-3-35:2022. Fibre Optic Interconnecting Devices and Passive Components – Basic Test and Measurement Procedures – Part 3-35: Examinations and Measurements – Visual Inspection of Fibre Optic Connectors and Fibre-Stub Transceivers. IEC, 2022.

10. IEC 61315:2019. Calibration of Fibre-Optic Power Meters. IEC, 2019.

Тема 3. Оптична рефлектометрія у часовій області (OTDR)

1. ITU-T G.650.3 (08/2017). Test Methods for Installed Single-Mode Optical Fibre Cable Links. ITU, 2017.

2. ITU-T G.650.1 (01/2024). Definitions and Test Methods for Linear, Deterministic Attributes of Single-Mode Fibre and Cable. ITU, 2024.

3. IEC 60793-1-40:2024. Optical Fibres – Part 1-40: Attenuation Measurement Methods. IEC, 2024.

4. IEC 61280-4-2:2024. Fibre-Optic Communication Subsystem Test Procedures – Part 4-2: Installed Cabling Plant – Single-Mode Attenuation and Optical Return Loss Measurements. IEC, 2024.

5. IEC 61280-4-3:2022. Fibre Optic Communication Subsystem Test Procedures – Part 4-3: Installed Passive Optical Networks – Attenuation and Optical Return Loss Measurements. IEC, 2022.

6. Straub M., Reber J., Saier T., Borkowski R., Li S., Khomchenko D., Richter A., Färber M., Käfer T., Bonk R. ML Approaches for OTDR Diagnoses in Passive Optical Networks–Event Detection and Classification: Ways for ODN Branch Assignment. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2024. Vol. 16, No. 7. P. C43–C50. DOI: 10.1364/JOCN.516659.

7. Abdelli K., Tropschug C., Griesser H., Pachnicke S. Faulty Branch Identification in Passive Optical Networks Using Machine Learning. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2023. Vol. 15, No. 4. P. 187–196. DOI: 10.1364/JOCN.475882.

8. Abdelli K., Griesser H., Tropschug C., Pachnicke S. Optical Fiber Fault Detection and Localization in a Noisy OTDR Trace Based on Denoising Convolutional Autoencoder and Bidirectional Long Short-Term Memory. *Journal of Lightwave Technology*. 2022. Vol. 40, No. 8. P. 2254–2264. DOI: 10.1109/JLT.2021.3138268.

9. Li X., Liang J., Zhu J., Shi S., Ding F., Sun J., Liu B. Small Sample Fiber Full State Diagnosis Based on Fuzzy Clustering and Improved ResNet Network. *IET Signal Processing*. 2024. Vol. 2024. Article 5512014. 12 p. DOI: 10.1049/2024/5512014.

10. Liu P., Ji W., Liu Q., Xue X. AI-Assisted Failure Location Platform for Optical Network. *International Journal of Optics*. 2023. Vol. 2023. Article 1707815. 10 p. DOI: 10.1155/2023/1707815.

Тема 4. Інструментальні вимірювання параметрів антенно-фідерних трактів

1. Dunsmore J. P. Handbook of Microwave Component Measurements: With Advanced VNA Techniques. 2nd ed. Wiley, 2020. 840 p. DOI: 10.1002/9781119477167.

2. IEEE Std 149-2021. IEEE Recommended Practice for Antenna Measurements. IEEE, 2022.

3. Foged L. J., Sierra Castañer M. Modern Automotive Antenna Measurements. Artech House, 2022. 367 p.

4. Duan S., Wang W., Tang B., Wu Y., Liu Y. A Review of Over-the-Air Testing Methods for Performance Measurement of Antennas and Devices in Communication Systems. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2024. Vol. 2024. Article 6660144. 20 p. DOI: 10.1155/2024/6660144.

5. Kandregula V. R., Zaharis Z. D., Ahmed Q. Z., Khan F. A., Loh T. H., Schreiber J., Serres A. J. R., Lazaridis P. I. A Review of Unmanned Aerial Vehicle Based Antenna and Propagation Measurements. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 22. Article 7395. DOI: 10.3390/s24227395.

6. Rappaport T. S., Remley K. A., Gentile C., Molisch A. F., Zajić A., eds. Radio Propagation Measurements and Channel Modeling: Best Practices for Millimeter-Wave and Sub-Terahertz Frequencies. Cambridge University Press, 2022. 304 p. DOI: 10.1017/9781009122740.

7. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM GUM-6:2020. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Part 6: Developing and Using Measurement Models. BIPM, 2020. DOI: 10.59161/JCGMGUM-6-2020.

8. IEEE Std 370-2020. IEEE Standard for Electrical Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50 GHz. IEEE, 2021.

9. Morris A. S., Langari R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 3rd ed. Academic Press, 2020.

Тема 5. Векторні аналізатори мереж (VNA)

1. Dunsmore J. P. Handbook of Microwave Component Measurements: With Advanced VNA Techniques. 2nd ed. Wiley, 2020. 840 p. DOI: 10.1002/9781119477167.

2. IEEE Std 370-2020. IEEE Standard for Electrical Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50 GHz. IEEE, 2021.
3. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM GUM-6:2020. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Part 6: Developing and Using Measurement Models. BIPM, 2020. DOI: 10.59161/JCGMGUM-6-2020.
4. Hatab Z., Gadringer M. E., Bösch W. Propagation of Linear Uncertainties Through Multiline Thru-Reflect-Line Calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. Article 1007409. P. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2023.3296123.
5. Hatab Z., Gadringer M. E., Bösch W. A Thru-Free Multiline Calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. Article 1008709. P. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2023.3308226.
6. Hatab Z., Gadringer M. E., Bösch W. Symmetric–Reciprocal–Match Method for Vector Network Analyzer Calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024. Vol. 73. Article 1001911. P. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2024.3350124.
7. Hatab Z., Gadringer M. E., Bösch W. Indirect Measurement of Switch Terms of a Vector Network Analyzer With Reciprocal Devices. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*. 2023. Vol. 33, No. 11. P. 1588–1591. DOI: 10.1109/LMWT.2023.3311032.
8. Hatab Z., Gadringer M. E., Bösch W. Error-Box Calibration of Three-Sampler VNAs. *2024 102nd ARFTG Microwave Measurement Conference*. 2024. P. 1–4. DOI: 10.1109/ARFTG59840.2024.10460715.
9. Dubey S. K., Narang N., Negi P. S., Ojha V. N. LabVIEW Based Automation Guide for Microwave Measurements. Singapore: Springer, 2017; copyright 2018. XIV, 45 p. DOI: 10.1007/978-981-10-6280-3.
10. European co-operation for Accreditation. EA-4/02 M:2022. Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Revision 03. EA, 2022.

Тема 6. Інструментальні вимірювання параметрів радіоканалів та бездротових мереж

1. Molisch A. F. Wireless Communications: From Fundamentals to Beyond 5G. 3rd ed. Wiley-IEEE Press, 2022. 1008 p.
2. Rappaport T. S., Remley K. A., Gentile C., Molisch A. F., Zajić A., eds. Radio Propagation Measurements and Channel Modeling: Best Practices for Millimeter-Wave and Sub-Terahertz Frequencies. Cambridge University Press, 2022. 304 p. DOI: 10.1017/9781009122740.
3. Dunsmore J. P. Handbook of Microwave Component Measurements: With Advanced VNA Techniques. 2nd ed. Wiley, 2020. 840 p. DOI: 10.1002/9781119477167.

4. Morris A. S., Langari R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 3rd ed. Academic Press, 2020. ISBN: 9780128171417.
5. IEEE Std 1057-2017. IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders. IEEE, 2018.
6. ETSI TS 138 104 V17.8.0 (2023-01). 5G; NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception. 3GPP TS 38.104, version 17.8.0, Release 17. ETSI, 2023.
7. ETSI TS 138 141-1 V17.8.0 (2023-01). 5G; NR; Base Station (BS) Conformance Testing – Part 1: Conducted Conformance Testing. 3GPP TS 38.141-1, version 17.8.0, Release 17. ETSI, 2023.
8. ETSI TS 138 215 V17.2.0 (2022-09). 5G; NR; Physical Layer Measurements. 3GPP TS 38.215, version 17.2.0, Release 17. ETSI, 2022.
9. ETSI TR 138 901 V17.1.0 (2024-01). 5G; Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz. 3GPP TR 38.901, version 17.1.0, Release 17. ETSI, 2024.
10. Duan S., Wang W., Tang B., Wu Y., Liu Y. A Review of Over-the-Air Testing Methods for Performance Measurement of Antennas and Devices in Communication Systems. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2024. Vol. 2024. Article 6660144. 20 p. DOI: 10.1155/2024/6660144.

Тема 7. Основи спектрального аналізу та принцип роботи спектроаналізатора

1. Morris A. S., Langari R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 3rd ed. Academic Press, 2020. ISBN: 9780128171417.
2. Dunsmore J. P. Handbook of Microwave Component Measurements: With Advanced VNA Techniques. 2nd ed. Wiley, 2020. 840 p. DOI: 10.1002/9781119477167.
3. CISPR 16-1-1:2019. Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods – Part 1-1: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus – Measuring Apparatus. IEC, 2019.
4. IEEE Std 1241-2023. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. IEEE, 2023.
5. IEEE Std 1057-2017. IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders. IEEE, 2018.
6. ITU-R SM.328-12 (09/2025). Spectra and Bandwidth of Emissions. ITU, 2025.
7. Andrade K., Patiño F., Sánchez-Almeida T. A Spectrum Analyzer in the 470 to 698 MHz Band Using Software Defined Radio for the Analysis of Digital Terrestrial Television Signals (DTTs). *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 47, No. 1. Article 22. DOI: 10.3390/engproc2023047022.

Тема 8. Корпоративні та промислові мережі. Локальна та операційна діагностика

1. Kurose J. F., Ross K. W. Computer Networking: A Top-Down Approach. 8th ed., Global Edition. Pearson, 2021.
2. IEEE Std 802.3-2022. IEEE Standard for Ethernet. IEEE, 2022.
3. IEEE Std 802.1Q-2022. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks. IEEE, 2022.
4. IEEE Std 802.11-2024. IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems–Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE, 2025. Опубліковано 28.04.2025.
5. ISO/IEC 11801-1:2017. Information Technology – Generic Cabling for Customer Premises – Part 1: General Requirements. ISO/IEC, 2017.
6. ISO/IEC 14763-2:2019. Information Technology – Implementation and Operation of Customer Premises Cabling – Part 2: Planning and Installation. ISO/IEC, 2019.
7. IEC 61935-1:2019. Specification for the Testing of Balanced and Coaxial Information Technology Cabling – Part 1: Installed Balanced Cabling as Specified in ISO/IEC 11801-1 and Related Standards. IEC, 2019.
8. IEC 61918:2018+AMD1:2022+AMD2:2024 CSV. Industrial Communication Networks – Installation of Communication Networks in Industrial Premises. Consolidated version. IEC, 2024.
9. Bjorklund M. A YANG Data Model for Interface Management. RFC 8343. IETF, March 2018. DOI: 10.17487/RFC8343.
10. Clemm A., Medved J., Varga R., Bahadur N., Ananthakrishnan H., Liu X. A YANG Data Model for Network Topologies. RFC 8345. IETF, March 2018. DOI: 10.17487/RFC8345.

Тема 9. Моніторинг і діагностика в експлуатації

1. Majors C., Fong-Jones L., Miranda G. Observability Engineering. O'Reilly Media, 2022. 318 p.
2. Song H., Qin F., Martinez-Julia P., Ciavaglia L., Wang A. Network Telemetry Framework. RFC 9232. IETF, May 2022. DOI: 10.17487/RFC9232.
3. Vallin S., Bjorklund M. A YANG Data Model for Alarm Management. RFC 8632. IETF, September 2019. DOI: 10.17487/RFC8632.
4. Voit E., Clemm A., Gonzalez Prieto A., Nilsen-Nygaard E., Tripathy A. Subscription to YANG Notifications. RFC 8639. IETF, September 2019. DOI: 10.17487/RFC8639.
5. Clemm A., Voit E. Subscription to YANG Notifications for Datastore Updates. RFC 8641. IETF, September 2019. DOI: 10.17487/RFC8641.

6. Wu Q., Boucadair M., eds.; Lopez D., Xie C., Geng L. A Framework for Automating Service and Network Management with YANG. RFC 8969. IETF, January 2021. DOI: 10.17487/RFC8969.
7. Claise B., Quilbeuf J., Lopez D., Voyer D., Arumugam T. Service Assurance for Intent-Based Networking Architecture. RFC 9417. IETF, July 2023. DOI: 10.17487/RFC9417.
8. Bierman A., Bjorklund M., Schoenwaelder J., Watsen K., Wilton R. YANG Library. RFC 8525. IETF, March 2019. DOI: 10.17487/RFC8525.
9. Bjorklund M. A YANG Data Model for Interface Management. RFC 8343. IETF, March 2018. DOI: 10.17487/RFC8343.

- I - 74 Інструментальне вимірювання та діагностика в телекомунікаціях.
Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі» спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка / уклад. Н. М. Якимчук. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 117 с.

Комп'ютерний набір
Редактор

Наталія ЯКИМЧУК
Наталія ЯКИМЧУК

Підп. до друку «__» _____ 2026 р.
Формат 60х84/16. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 2.
Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП ЛНТУ