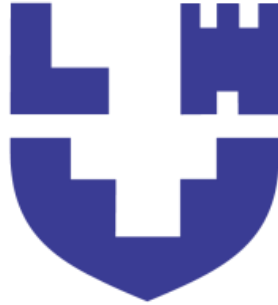


Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет



## ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ВИМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Методичні вказівки до лабораторних робіт  
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

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 ПОЛІЩУК

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

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

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

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

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

I - 74      Інструментальне вимірювання та діагностика в телекомунікаціях.  
Методичні вказівки до лабораторних робіт 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. 52 с.

Видання містить виклад основних теоретичних відомостей, хід лабораторних робіт та контрольні запитання для засвоєння знань і вмінь 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  |
| Лабораторна робота 1                                                                                                                            |    |
| Вимірювання затримки сигналу та швидкості поширення в лінії передачі за допомогою осцилографа.....                                              | 5  |
| Лабораторна робота 2                                                                                                                            |    |
| Дослідження параметрів та спотворень цифрових сигналів у телекомунікаційних каналах за допомогою осцилографа.....                               | 11 |
| Лабораторна робота 3                                                                                                                            |    |
| Вимірювання параметрів підсилювачів у тракті передачі сигналів.....                                                                             | 15 |
| Лабораторна робота 4                                                                                                                            |    |
| Вимірювання характеристик антени в телекомунікаційних системах за допомогою RF Power Meter.....                                                 | 20 |
| Лабораторна робота 5                                                                                                                            |    |
| Дослідження параметрів антен і ліній передачі за допомогою векторного аналізатора мереж.....                                                    | 27 |
| Лабораторна робота 6                                                                                                                            |    |
| Дослідження S-параметрів і частотних характеристик пасивних елементів телекомунікаційних трактів за допомогою векторного аналізатора мереж..... | 32 |
| Лабораторна робота 7                                                                                                                            |    |
| Діагностика кабельних ліній зв'язку за допомогою кабельного тестера.....                                                                        | 35 |
| Лабораторна робота 8                                                                                                                            |    |
| Аналіз мережевого трафіку на каналному рівні за допомогою Wireshark..                                                                           | 38 |
| Лабораторна робота 9                                                                                                                            |    |
| Моніторинг якості Wi-Fi мережі.....                                                                                                             | 42 |
| Лабораторна робота 10                                                                                                                           |    |
| Моделювання та діагностика телекомунікаційної мережі на фізичному і каналному рівнях у Cisco Packet Tracer.....                                 | 45 |
| Список рекомендованих джерел.....                                                                                                               | 51 |

## Вступ

Надійність телекомунікаційних мереж залежить від характеристик їхніх компонентів, умов передавання сигналів і своєчасного виявлення несправностей. Вимірювання параметрів сигналів, кабельних ліній, антен і мережевого обладнання дає змогу оцінювати технічний стан системи, встановлювати причини погіршення зв'язку та обґрунтовувати рішення щодо його відновлення. Тому володіння методами інструментального вимірювання й діагностики є важливою складовою професійної підготовки фахівців із комп'ютеризованих телекомунікаційних мереж.

Методичні вказівки призначені для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Комп'ютеризовані телекомунікаційні мережі» спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка». Видання забезпечує практичне опанування матеріалу дисципліни «Інструментальне вимірювання та діагностика в телекомунікаціях» і спрямоване на формування вмінь планувати вимірювання, налаштовувати обладнання, опрацьовувати експериментальні дані та інтерпретувати отримані результати.

До видання включено десять лабораторних робіт, послідовність яких охоплює дослідження сигналів і компонентів телекомунікаційних трактів, перевірку кабельної інфраструктури та аналіз роботи мереж. Осцилографічні вимірювання передбачають визначення затримки сигналу та швидкості його поширення, дослідження параметрів і спотворень цифрових сигналів, а також характеристик підсилювачів. Робота з вимірювачем радіочастотної потужності та векторним аналізатором мереж дає змогу опанувати методи дослідження антен, ліній передачі й пасивних елементів, оцінювання узгодження та частотних властивостей телекомунікаційних трактів.

Наступні роботи присвячено діагностиці кабельних ліній за допомогою кабельного тестера, аналізу трафіку на каналному рівні засобами Wireshark і моніторингу якості мережі Wi-Fi. Моделювання в Cisco Packet Tracer доповнює вимірювання на реальному обладнанні та дозволяє досліджувати вплив помилок фізичного й каналного рівнів на працездатність мережі, перевіряти припущення щодо причин несправностей і відпрацьовувати послідовність їх усунення.

Перед виконанням роботи необхідно ознайомитися з її змістом, повторити відповідний теоретичний матеріал і вивчити правила безпечного користування обладнанням. Підсумком виконання є звіт із результатами вимірювань, розрахунками та обґрунтованими висновками. Такий підхід формує навички послідовної технічної діагностики, у якій кожне припущення перевіряється вимірюванням, а висновок ґрунтується на отримані дані.

## Лабораторна робота 1

### Вимірювання затримки сигналу та швидкості поширення в лінії передачі за допомогою осцилографа

Мета роботи: навчитися вимірювати часову затримку сигналу в лінії передачі, визначати швидкість його поширення та оцінювати вплив довжини лінії на часові параметри сигналу за допомогою цифрового осцилографа..

#### Теоретичні відомості

У телекомунікаційних системах сигнал поширюється лінією передачі не миттєво, а з певною швидкістю, яка залежить від фізичних властивостей середовища. У коаксіальних кабелях, витій парі, мікросмужкових лініях та інших трактах швидкість поширення сигналу завжди менша за швидкість світла у вакуумі. Саме тому при аналізі реальних систем важливим параметром є **часова затримка сигналу**.

Часова затримка є інтервалом часу між моментом появи сигналу на вході лінії та моментом його появи на виході. Якщо довжина лінії дорівнює  $l$ , а швидкість поширення сигналу в ній дорівнює  $v$ , то затримка визначається співвідношенням:

$$\tau = \frac{l}{v}. \quad (1.1)$$

Для порівняння швидкості сигналу в лінії зі швидкістю світла часто використовують коефіцієнт укорочення або коефіцієнт швидкості:

$$k = \frac{v}{c}, \quad (1.2)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі.

У реальних кабелях значення  $k$  зазвичай становить від 0,6 до 0,85 залежно від типу діелектрика. Це означає, що сигнал проходить кабель повільніше, ніж світлова хвиля у вакуумі.

Для вимірювання затримки зручно використовувати імпульсні або прямокутні сигнали, оскільки їх фронти дозволяють чітко визначити момент появи сигналу на вході та виході. Осцилограф із двома каналами дає змогу одночасно спостерігати вхідний і вихідний сигнали та безпосередньо вимірювати часовий зсув між ними.

Під час вимірювання важливо враховувати, що затримка може бути дуже малою. Тому для підвищення точності слід використовувати достатньо довгі лінії передачі або працювати з високою часовою роздільною здатністю осцилографа. Якщо

порівнюються дві лінії різної довжини, то можна визначити додаткову затримку, яку вносить кожна додаткова ділянка кабелю.

У телекомунікаціях вимірювання затримки є важливим при аналізі синхронізації, визначенні часу проходження сигналів, діагностиці ліній передачі та оцінюванні часових параметрів мережевих трактів. Знання швидкості поширення дозволяє також розраховувати електричну довжину лінії та оцінювати місце дефекту при рефлектометричних вимірюваннях.

Цифровий осцилограф FNIRSI-1014D є вимірювальним приладом (рис. 1.1), призначеним для дослідження електричних сигналів у часовій області, що дозволяє отримати їх форму, амплітудні та частотні характеристики. На відміну від аналогових осцилографів, у яких сигнал безпосередньо відображається на екрані, цифровий осцилограф виконує попереднє перетворення сигналу в цифрову форму, що забезпечує більшу точність, стабільність та можливість подальшої обробки.

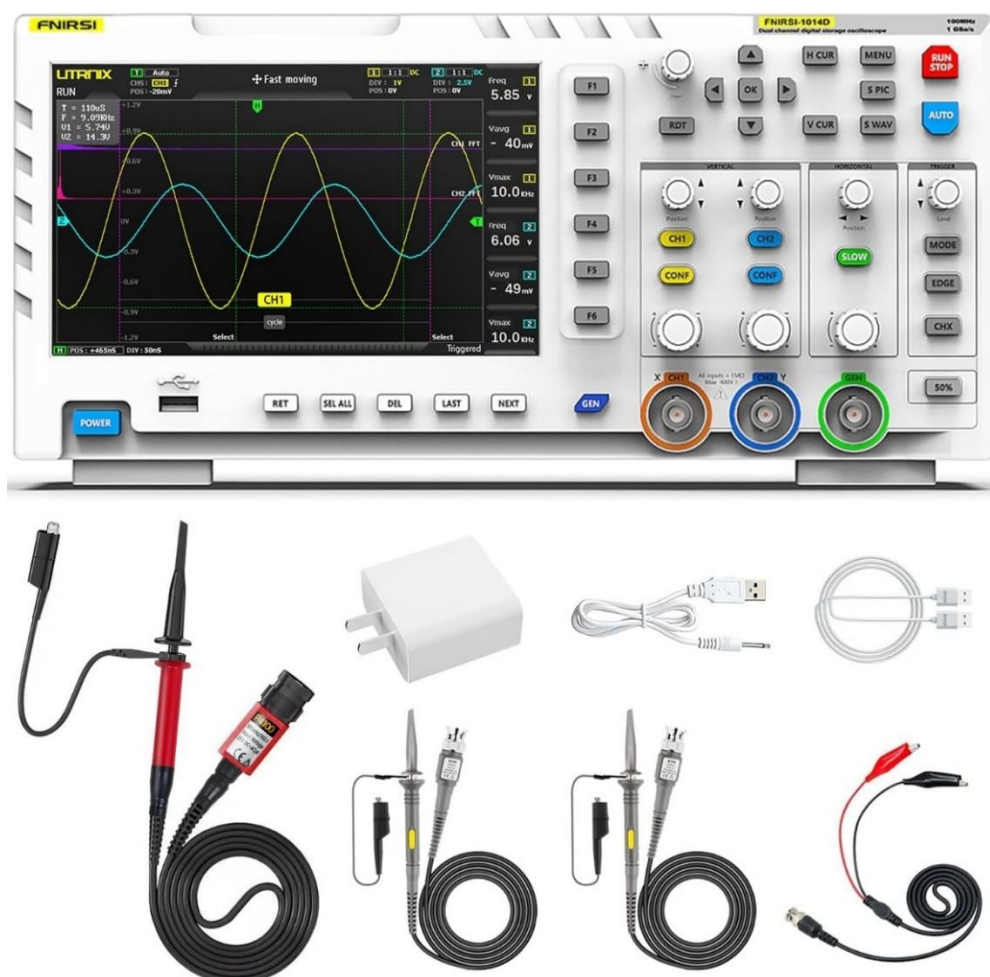


Рисунок 1.1 – Цифровий осцилограф FNIRSI-1014D

Робота приладу починається з подачі досліджуваного сигналу через вимірювальний щуп на вхід осцилографа (рис. 1.2). У входному тракті сигнал зазнає узгодження з вхідним опором приладу, а також може бути ослаблений або підсилений

залежно від обраного масштабу. Після цього сигнал надходить на аналого-цифровий перетворювач, де здійснюється його дискретизація, тобто перетворення безперервного сигналу у послідовність миттєвих значень, взятих через рівні проміжки часу.

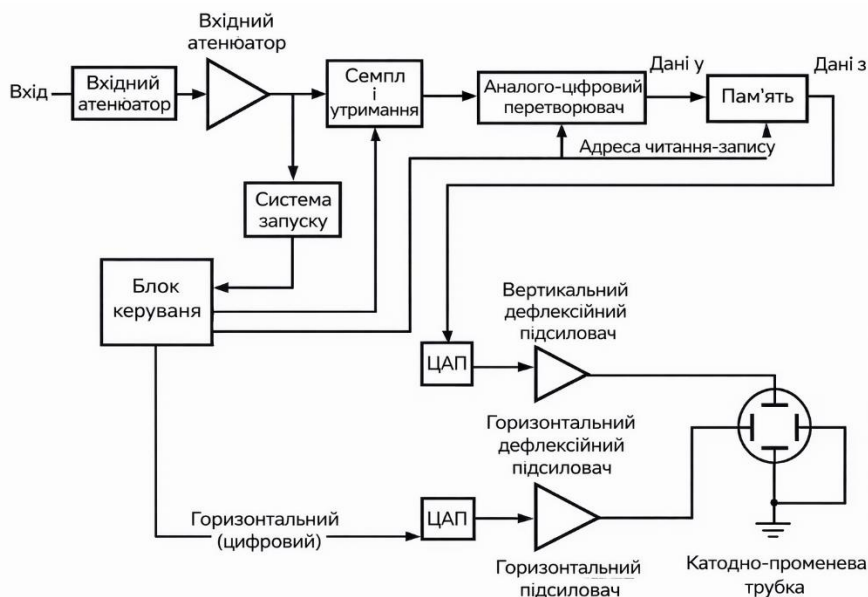


Рисунок 1.2 – Структурна схема цифрового осцилографа

Отримані миттєві значення перетворюються в цифровий код відповідно до розрядності аналого-цифрового перетворювача, що визначає точність представлення амплітуди сигналу. Далі цифрові дані зберігаються в буферній пам'яті, що дозволяє фіксувати та аналізувати сигнали протягом певного інтервалу часу. Важливу роль у роботі осцилографа відіграє система запуску, яка визначає момент початку реєстрації сигналу, наприклад при досягненні заданого рівня напруги, що забезпечує стабільність та повторюваність зображення на екрані.

Після накопичення даних здійснюється їх цифрова обробка, яка включає масштабування, фільтрацію та виконання автоматичних вимірювань. Оброблений сигнал відображається на екрані у вигляді осцилограми, що дає змогу користувачеві візуально оцінити форму сигналу та визначити його основні параметри, такі як амплітуда, період і частота.

Точність відображення сигналу суттєво залежить від частоти дискретизації, яка повинна бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту досліджуваного сигналу, що відповідає теоремі Найквіста. Недотримання цієї умови призводить до спотворення форми сигналу та появи ефекту накладання частот.

Таким чином, цифровий осцилограф FNIRSI-1014D реалізує повний цикл обробки сигналу від його прийому до відображення, що забезпечує широкі можливості для аналізу процесів у телекомунікаційних та електронних системах.

Оцінка похибки вимірювань.

Для оцінювання точності роботи осцилографа отримані експериментальні значення параметрів сигналу необхідно порівняти із заданими значеннями генератора. Найчастіше в цій роботі порівнюють амплітуду, період і частоту сигналу. Похибка вимірювання показує, наскільки результат, отриманий за допомогою осцилографа, відрізняється від заданого або еталонного значення.

Спочатку визначають абсолютну похибку вимірювання. Для будь-якого параметра вона обчислюється як модуль різниці між виміряним значенням і заданим значенням генератора:

$$\Delta x = |x_{вим} - x_{зад}|, \quad (1.3)$$

де  $x_{вим}$  – значення параметра, виміряне осцилографом, а  $x_{зад}$  – значення цього параметра, встановлене на генераторі.

Для зручності аналізу також визначають відносну похибку, яка показує похибку у частках від заданого значення:

$$\delta_x = \frac{|x_{вим} - x_{зад}|}{x_{зад}}. \quad (1.4)$$

Оскільки частота і період пов'язані співвідношенням  $f = \frac{1}{T}$ , то частоту можна не лише вимірювати безпосередньо, а й обчислювати за виміряним періодом. У такому разі доцільно порівняти частоту, визначену двома способами: за автоматичними вимірюваннями осцилографа і за формулою через період. Це дозволяє додатково перевірити правильність результатів.

Під час аналізу похибки потрібно враховувати, що її причинами можуть бути неточність установлення параметрів генератора, похибка самого осцилографа, неправильний вибір масштабу по часу або напрузі, а також похибки зчитування значень з екрана. Тому для зменшення похибки необхідно правильно вибирати масштаб зображення, забезпечувати стабільну синхронізацію сигналу та використовувати автоматичні вимірювання разом із візуальною перевіркою осцилограми.

### Хід роботи

Дослідити електричні сигнали за допомогою цифрового осцилографа FNIRSI-1014D, виконати вимірювання їх часових та амплітудних параметрів, а також проаналізувати вплив налаштувань осцилографа на точність відображення сигналу.

Обладнання. Цифровий осцилограф з двома каналами, генератор імпульсних сигналів, коаксіальні кабелі або інші лінії передачі різної довжини, трійник або розгалужувач сигналу, з'єднувальні провідники, навантаження, параметри яких задаються викладачем.

1.Перед початком роботи необхідно перевірити справність осцилографа, підключити вимірювальний щуп до першого каналу та виконати його компенсацію (калібрування) за допомогою вбудованого тестового сигналу. Після цього слід під'єднати щуп до джерела сигналу, параметри якого задаються викладачем (тип сигналу, амплітуда, частота).

2.На початковому етапі необхідно встановити відповідний масштаб по напрузі (Volts/Div) таким чином, щоб сигнал повністю відображався на екрані без обрізання. Далі слід підібрати масштаб по часу (Time/Div), щоб на екрані було видно декілька періодів сигналу. Після цього потрібно налаштувати систему синхронізації (Trigger), встановивши тип запуску (наприклад, по фронту) та рівень спрацювання, що забезпечить стабільне зображення сигналу.

3.Після отримання стабільної осцилограми необхідно виконати вимірювання основних параметрів сигналу. За допомогою вбудованих функцій осцилографа або курсорів слід визначити амплітуду сигналу, його період та частоту. Отримані значення необхідно порівняти із заданими параметрами генератора сигналу та оцінити похибку вимірювань.

4.На наступному етапі потрібно змінити параметри сигналу (за вказівкою викладача) та повторити вимірювання. Особливу увагу слід звернути на вплив масштабу по часу та напрузі на точність відображення сигналу, а також на вплив частоти дискретизації при різних налаштуваннях осцилографа.

5.Додатково необхідно дослідити імпульсний сигнал, визначивши його тривалість, період повторення та шпаруватість. За можливості слід порівняти результати вимірювань для різних форм сигналу (синусоїдальний, прямокутний, трикутний).

6.Дослідити лінію передачі відомої довжини. За допомогою курсорів або автоматичних вимірювань осцилографа потрібно визначити часовий зсув між фронтом сигналу на першому каналі та відповідним фронтом сигналу на другому каналі. Отримане значення є затримкою сигналу в лінії.

7.Після цього необхідно повторити вимірювання для ліній іншої довжини. Для кожного випадку потрібно записати довжину лінії та відповідну затримку. На основі отриманих даних слід розрахувати швидкість поширення сигналу.

8. Після завершення експериментальної частини потрібно зробити узагальнення отриманих результатів та сформулювати висновки щодо особливостей роботи цифрового осцилографа.

### **Зміст звіту**

Звіт з практичної роботи повинен містити тему та мету роботи, короткі теоретичні відомості про принцип роботи цифрового осцилографа, опис використаного обладнання та параметрів сигналів, заданих викладачем. Обов'язково наводяться отримані осцилограми або їх ескізи, результати вимірювань у вигляді таблиць, а також розрахунок основних параметрів сигналу (амплітуда, період, частота).

Окремо потрібно виконати аналіз залежності затримки від довжини лінії та порівняти отримані результати з типовими значеннями для досліджуваного типу кабелю. Завершується звіт висновками, у яких студент формулює основні результати роботи та оцінює практичне значення вимірювання часової затримки в телекомунікаційних системах.

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть принцип роботи цифрового осцилографа та основні етапи обробки сигналу в ньому.

2. Чим цифровий осцилограф відрізняється від аналогового? Які його основні переваги?

3. Що таке дискретизація сигналу і як частота дискретизації впливає на точність вимірювань?

4. Поясніть призначення системи синхронізації (Trigger) і що відбувається при неправильному її налаштуванні.

5. Як визначити амплітуду, період і частоту сигналу за допомогою осцилографа?

6. Що таке ефект накладання частот (аліасинг) і за яких умов він виникає?

7. Як вибір масштабу по часу (Time/Div) та напрузі (Volts/Div) впливає на якість відображення сигналу?

8. Які основні джерела похибок під час вимірювання сигналів осцилографом і як їх можна зменшити?

## Лабораторна робота 2

### Дослідження параметрів та спотворень цифрових сигналів у телекомунікаційних каналах за допомогою осцилографа

Мета роботи: дослідити форму та параметри цифрових сигналів у телекомунікаційних системах, проаналізувати вплив спотворень і шумів на якість передавання інформації та навчитися використовувати осцилограф для оцінювання параметрів сигналу, таких як тривалість біта, рівні логічних сигналів і спотворення фронтів.

#### Теоретичні відомості

У сучасних телекомунікаційних системах передавання інформації здійснюється у вигляді цифрових сигналів, які мають обмежену тривалість імпульсів і чітко визначені рівні логічних «0» і «1». Якість передавання таких сигналів безпосередньо залежить від впливу каналу зв'язку, який може вносити шуми, затримки, спотворення форми імпульсів та нестабільність фронтів.

Одним із ключових інструментів аналізу цифрових сигналів є осцилограф, який дозволяє досліджувати часові параметри сигналу. Основною характеристикою є тривалість біта, яка визначає швидкість передавання даних. Чим менша тривалість біта, тим вища швидкість, але тим більші вимоги до якості каналу.

У телекомунікаційних системах якість передавання цифрового сигналу зручно оцінювати не лише за формою осцилограми, а й за ймовірністю бітової помилки BER. BER показує, яка частка переданих бітів була прийнята неправильно. У загальному випадку BER визначають як відношення кількості помилково прийнятих бітів до загальної кількості переданих бітів. Такий підхід є базовим для аналізу цифрових каналів зв'язку.

Формула розрахунку BER має вигляд:

$$BER = \frac{N_{ном}}{N_{заг}}, \quad (2.1)$$

де  $N_{ном}$  – кількість помилкових бітів, а  $N_{заг}$  – загальна кількість переданих або перевічених бітів.

Якщо відома швидкість передавання  $R_b$  та час спостереження  $t$ , то загальну кількість переданих бітів можна визначити як:

$$N_{заг} = R_b \cdot t. \quad (2.2)$$

Тоді

$$BER = \frac{N_{ном}}{R_b \cdot t}. \quad (2.3)$$

Наприклад, якщо сигнал передавався зі швидкістю  $R_b = 1$  Мбіт/с протягом  $t = 10$  с, то за цей час було передано  $= 1 \cdot 10^6 \cdot 10 = 10^7$  біт. Якщо зафіксовано 25 помилок, тоді

$$BER = \frac{25}{10^7} = 2,5 \cdot 10^{-6}.$$

Це означає, що в середньому помилковими є приблизно 2,5 біта на кожен мільйон переданих бітів.

Для лабораторної роботи з осцилографом важливо розуміти, що BER часто не вимірюється безпосередньо самим осцилографом початкового рівня, але його можна оцінити опосередковано через якість око-діаграми, рівень шуму, джитер і стабільність фронтів. Око-діаграма є зручним часовим відображенням цифрового сигналу, яке дозволяє візуально оцінити запас за амплітудою і за часом (рис. 2.1). Чим ширше і вище «око», тим кращі умови для правильного розпізнавання бітів приймачем; звуження ока пов'язане з ростом впливу шуму, міжсимвольної інтерференції та джитера, а отже і з погіршенням BER.

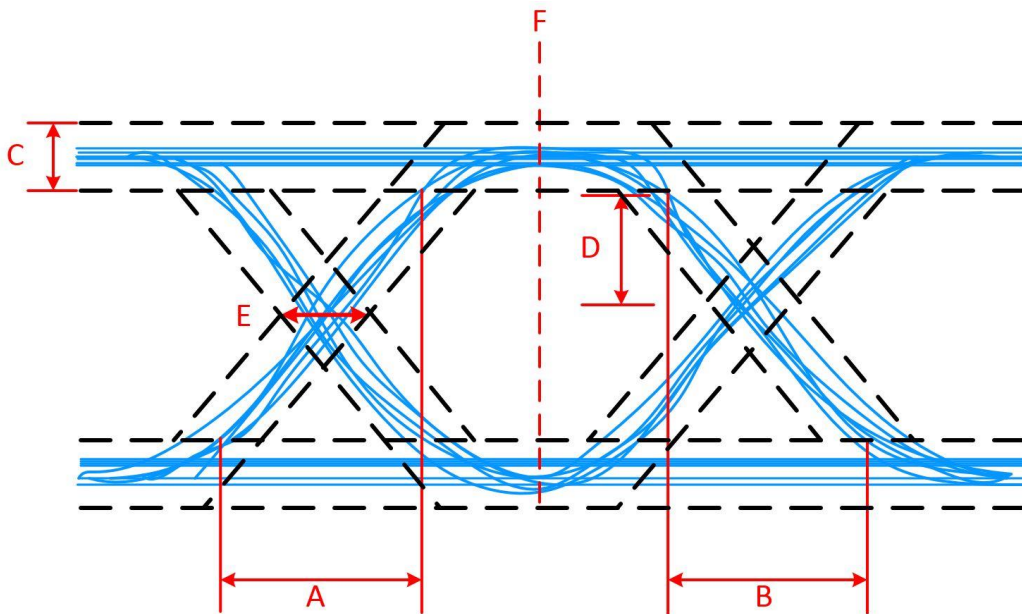


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення око-діаграми

Параметри око-діаграми цифрового сигналу: A – тривалість біта; B – інтервал прийняття рішення (часове відкриття ока); C – амплітуда сигналу; D – вертикальне

відкриття ока (запас за напругою); Е – зона невизначеності; F – оптимальний момент зчитування.

У спрощеному аналізі доцільно пов'язувати BER з кількістю помилкових рішень під час приймання тестової бітової послідовності. Якщо порівнювати передану і прийняту послідовності, то можна використати формулу

$$BER = \frac{N_1 + N_0}{N}, \quad (2.4)$$

де  $N_1$  – кількість помилок типу «0 прийнято як 1»,  $N_0$  – кількість помилок типу «1 прийнято як 0», а  $N$  – загальна кількість переданих бітів.

Іноді зручніше користуватися відсотком помилок:

$$P_{\text{пом}} = BER \cdot 100\%. \quad (2.5)$$

Важливим параметром є також джитер (jitter) – це випадкові або систематичні відхилення моментів перемикавання сигналу від ідеального положення у часі. Джитер призводить до помилок приймання даних, особливо на високих швидкостях.

Якість сигналу можна оцінювати за такими ознаками: чіткість фронтів, рівень шуму, стабільність періоду сигналу, симетричність імпульсів та ступінь відкритості око-діаграми. Осцилограф дозволяє візуально оцінити ці параметри навіть без складних вимірювань.

### **Хід роботи**

Дослідити цифровий сигнал, оцінити його параметри та визначити вплив спотворень на якість передавання інформації.

1. На початку роботи необхідно підключити осцилограф до генератора цифрового сигналу, параметри якого задаються викладачем. Після цього слід встановити масштаб по напрузі так, щоб рівні логічного «0» і «1» чітко відображалися на екрані, а також підібрати масштаб по часу, щоб було видно декілька бітів сигналу.

2. Далі потрібно налаштувати синхронізацію сигналу таким чином, щоб осцилограма була стабільною. Після цього слід визначити тривалість біта за допомогою курсорів або автоматичних вимірювань та розрахувати швидкість передавання даних.

3. На наступному етапі необхідно дослідити форму сигналу, звернувши увагу на крутизну фронтів, наявність шуму та спотворень. Потрібно визначити рівні логічних сигналів і оцінити їх стабільність.

4. Після цього, якщо дозволяють можливості осцилографа або за методикою «накладання», необхідно сформулювати аналог око-діаграми. Для цього спостерігається накладання декількох періодів сигналу та оцінюється ступінь «відкритості ока». Під час аналізу цифрового сигналу якість передавання оцінюють за формою осцилограми, ступенем відкритості око-діаграми та ймовірністю бітової помилки BER. Значення BER визначається як відношення кількості помилкових бітів до загальної кількості переданих бітів. Погіршення форми око-діаграми, збільшення шуму та джитера призводять до зростання BER і зменшення надійності передавання інформації.

5. Далі необхідно змінити параметри сигналу або додати штучні завади (за вказівкою викладача) та повторити вимірювання. Порівняти отримані результати та зробити висновки щодо впливу шумів і спотворень.

Що виміряти та визначити: тривалість біта, частоту (швидкість передавання), рівні логічного «0» та «1», фронт і спад сигналу, наявність шумів, візуальну оцінку око-діаграми, наявність джитера.

### **Зміст звіту**

Звіт повинен містити тему та мету роботи, короткі теоретичні відомості про цифрові сигнали та їх параметри, опис експериментальної установки та заданих параметрів сигналу. Необхідно навести осцилограми досліджуваних сигналів, результати вимірювань та розрахунків.

У звіті слід проаналізувати якість сигналу, оцінити вплив спотворень і шумів, пояснити зміну форми сигналу при зміні параметрів. Особливу увагу потрібно приділити поясненню «відкритості ока» та джитера. Завершується звіт висновками щодо якості передавання інформації в дослідженому каналі.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке тривалість біта і як вона пов'язана зі швидкістю передавання?
2. Поясніть поняття око-діаграма і що означає «відкрите» та «закрите» око.
3. Що таке джитер і як він впливає на якість сигналу?
4. Які основні причини спотворення цифрових сигналів у каналі зв'язку?
5. Як визначити рівні логічних сигналів за допомогою осцилографа?
6. Чому при збільшенні швидкості передачі погіршується форма сигналу?
7. Як шум впливає на приймання цифрового сигналу?
8. Які параметри сигналу найбільше впливають на ймовірність помилки передачі?

## Лабораторна робота 3

### Вимірювання параметрів підсилювачів у тракті передачі сигналів

Мета роботи: дослідити основні параметри підсилювача в телекомунікаційному тракті, визначити коефіцієнт підсилення, смугу пропускання та рівень нелінійних спотворень, а також навчитися використовувати осцилограф для аналізу якості сигналу.

#### Теоретичні відомості

У телекомунікаційних системах підсилювачі є невід'ємною частиною тракту передачі сигналів, оскільки вони забезпечують необхідний рівень сигналу для подальшої обробки або передавання. Якість роботи підсилювача визначається не лише величиною підсилення, але й здатністю передавати сигнал без спотворень у заданому частотному діапазоні.

Одним із основних параметрів є коефіцієнт підсилення, який показує, у скільки разів збільшується амплітуда сигналу:

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (3.1)$$

У децибелах підсилення визначається як

$$K_{\text{дБ}} = 20 \log_{10} \left( \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \right). \quad (3.2)$$

Іншою важливою характеристикою є смуга пропускання підсилювача – діапазон частот, у якому коефіцієнт підсилення не зменшується більш ніж на 3 дБ від максимального значення. Граничні частоти  $f_n$  та  $f_v$  визначаються за умовою:

$$K(f) = 0,707 \cdot K_{\text{max}}. \quad (3.3)$$

Смуга пропускання:

$$B = f_v - f_n. \quad (3.4)$$

Важливим показником якості є також нелінійні спотворення, які виникають при перевантаженні підсилювача або через нелінійність його характеристик. Вони

проявляються у вигляді спотворення форми сигналу, обмеження амплітуди (кліпінг), появи гармонік.

Осцилограф дозволяє безпосередньо порівнювати вхідний і вихідний сигнали та оцінювати ступінь спотворень.

Одним із основних показників нелінійності є коефіцієнт гармонічних спотворень (THD – Total Harmonic Distortion). Він характеризує відношення потужності всіх гармонік, що виникають у вихідному сигналі, до потужності основної гармоніки. Якщо на вхід підсилювача подається синусоїдальний сигнал, то в ідеальному випадку на виході також повинна бути синусоїда тієї ж частоти. Проте через нелінійність характеристик підсилювача з'являються гармоніки з частотами  $2f, 3f, 4f$  тощо.

Коефіцієнт THD визначається за формулою:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}, \quad (3.5)$$

де  $U_1$  – амплітуда основної гармоніки, а  $U_2, U_3, \dots$  – амплітуди вищих гармонік.

У відсотках:

$$THD\% = THD \cdot 100\%. \quad (3.6)$$

Чим менше значення THD, тим ближчий підсилювач до лінійного режиму і тим менше він спотворює сигнал. У телекомунікаційних системах навіть невеликі значення THD можуть бути критичними, особливо при передачі складних сигналів.

Іншим важливим параметром є точка перетину третього порядку (IP3 – Third-Order Intercept Point), яка широко використовується для оцінювання нелінійності підсилювачів у багаточастотних режимах. Якщо на вхід підсилювача подати два гармонічних сигнали з близькими частотами  $f_1$  і  $f_2$ , то внаслідок нелінійності на виході з'являються інтермодуляційні складові, зокрема третього порядку, які розташовані поблизу корисного сигналу та найбільше впливають на якість передавання з частотами  $2f_1 - f_2$  та  $2f_2 - f_1$ .

Амплітуда цих складових зростає швидше, ніж амплітуда основного сигналу. Якщо екстраполювати залежності рівнів основного сигналу та інтермодуляційних складових, можна визначити умовну точку їх перетину, яка і називається IP3. Чим вище значення IP3, тим краща лінійність і менші спотворення сигналу.

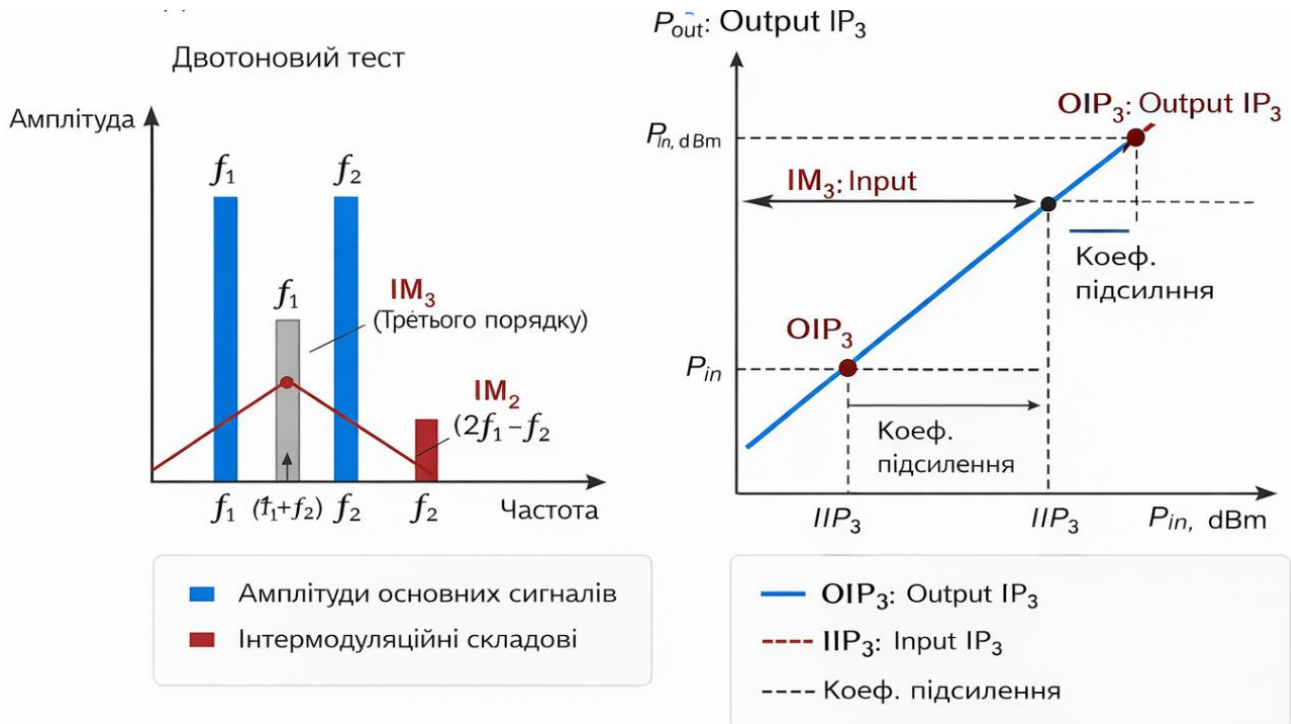


Рисунок 3.1 – Двотонний тест підсилювача та визначення точки перетину третього порядку (IP3): спектр інтермодуляційних складових та графік залежності вихідної потужності від вхідної.

Цей параметр не є реально досяжним режимом роботи, але він дозволяє оцінити рівень нелінійності підсилювача. Розрізняють:

- $IIP_3$  (Input IP3) – по відношенню до вхідного сигналу
- $OIP_3$  (Output IP3) – по відношенню до вихідного сигналу

Зв'язок між ними:

$$OIP3 = IIP3 + K_{dB}, \quad (3.7)$$

де  $K_{dB}$  – коефіцієнт підсилення у децибелах.

Практично  $IP_3$  визначає, наскільки добре підсилювач може працювати з багатосигнальними режимами без створення завад. Чим більше значення  $IP_3$ , тим вища лінійність підсилювача.

У лабораторних умовах ці параметри можна оцінити за допомогою осцилографа опосередковано. Збільшення THD проявляється у спотворенні форми синусоїдального сигналу, а також у появі «зрізаних» або асиметричних форм. Ознаки низького  $IP_3$  можна спостерігати як появу додаткових коливань або спотворень при одночасній передачі кількох сигналів.

Таким чином, THD характеризує нелінійність при одночастотному сигналі, а  $IP_3$  – при багаточастотному режимі, що робить їх взаємодоповнюючими параметрами для оцінювання якості підсилювачів у телекомунікаційних системах.

## **Хід роботи**

Дослідити підсилювач як елемент телекомунікаційного тракту, визначити його підсилення, частотні властивості та рівень спотворень.

Обладнання: цифровий осцилограф (FNIRSI-1014D або аналогічний), генератор сигналів, досліджуваний підсилювач, джерело живлення, з'єднувальні провідники.

1. Спочатку необхідно підключити генератор сигналу до входу підсилювача, а осцилограф – одночасно до входу і виходу (два канали). На генераторі встановлюється синусоїдальний сигнал з параметрами, заданими викладачем.

2. На першому етапі необхідно виміряти амплітуду вхідного та вихідного сигналів і визначити коефіцієнт підсилення. Отримані результати слід записати та перевести у децибели.

3. Далі проводиться дослідження частотної характеристики. Для цього частоту сигналу змінюють у заданому діапазоні, фіксуючи амплітуду вихідного сигналу. За результатами визначають граничні частоти та обчислюють смугу пропускання підсилювача.

4. На наступному етапі необхідно дослідити нелінійні спотворення. Для цього поступово збільшують амплітуду вхідного сигналу до появи видимих спотворень форми вихідного сигналу. Потрібно зафіксувати момент виникнення кліпінгу та описати зміну форми сигналу.

5. За можливості слід порівняти сигнали різної форми (синусоїдальний, прямокутний) та оцінити, як підсилювач впливає на їх передачу.

Результати вимірювань доцільно оформити у вигляді таблиць для різних частот. На основі отриманих даних будується залежність коефіцієнта підсилення від частоти (АЧХ).

Потрібно визначити: максимальне підсилення, граничні частоти, смугу пропускання, рівень спотворень.

## **Зміст звіту**

Звіт повинен містити тему та мету роботи, короткі теоретичні відомості, опис експериментальної установки та параметрів сигналу. Необхідно навести осцилограми вхідного і вихідного сигналів, результати вимірювань та побудовану амплітудно-частотну характеристику.

У звіті слід проаналізувати зміну підсилення з частотою, пояснити причини спотворень та оцінити придатність підсилювача для використання у телекомунікаційних системах. Завершується звіт висновками.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке коефіцієнт підсилення і як його визначити?
2. Як визначається смуга пропускання підсилювача?
3. Що означає рівень -3 дБ?
4. Які причини виникнення нелінійних спотворень?
5. Що таке кліпінг сигналу?
6. Як осцилограф допомагає оцінити якість підсилювача?
7. Як частота сигналу впливає на підсилення?
8. Чому підсилювач може погіршувати форму прямокутного сигналу?

## Вимірювання характеристик антени в телекомунікаційних системах за допомогою RF Power Meter

Мета роботи: ознайомитися з принципами вимірювання параметрів антен, навчитися визначати рівень прийнятого сигналу, досліджувати вплив відстані, орієнтації та поляризації антени на потужність сигналу, а також оцінювати характеристики антени на основі експериментальних даних.

### Теоретичні відомості

Антенa є ключовим елементом телекомунікаційної системи, що забезпечує перетворення електричних сигналів у електромагнітні хвилі та навпаки. Характеристики антени визначають ефективність передачі, дальність зв'язку, стійкість до завад і якість прийому сигналу (рис.4.1).

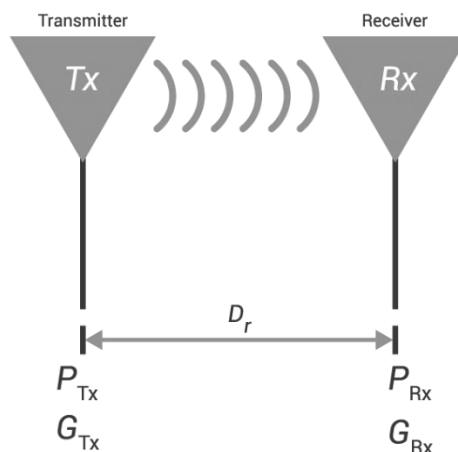


Рисунок 4.1 – Схема передавання- приймання сигналів

Однією з основних характеристик антени є коефіцієнт підсилення (gain), який показує, наскільки ефективно антена концентрує енергію в певному напрямку порівняно з ізотропним випромінювачем. Він пов'язаний із направленістю (directivity) та ефективністю (efficiency) антени:

$$G = \eta \cdot D, \quad (4.1)$$

де  $G$  – підсилення,  $D$  – направленість,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії антени.

Підсилення зазвичай виражається в децибелах відносно ізотропної антени (dBi). Антени з високим підсиленням мають вузьку діаграму спрямованості та забезпечують більшу концентрацію енергії в заданому напрямку.

Діаграма спрямованості антени описує просторовий розподіл випромінювання або прийому сигналу. Вона містить головний пелюсток, який визначає основний напрям випромінювання, та бічні пелюстки, що характеризують небажані напрямки. Важливим параметром є ширина діаграми спрямованості (НРВW) – кут, у межах якого рівень сигналу зменшується на 3 дБ від максимуму.

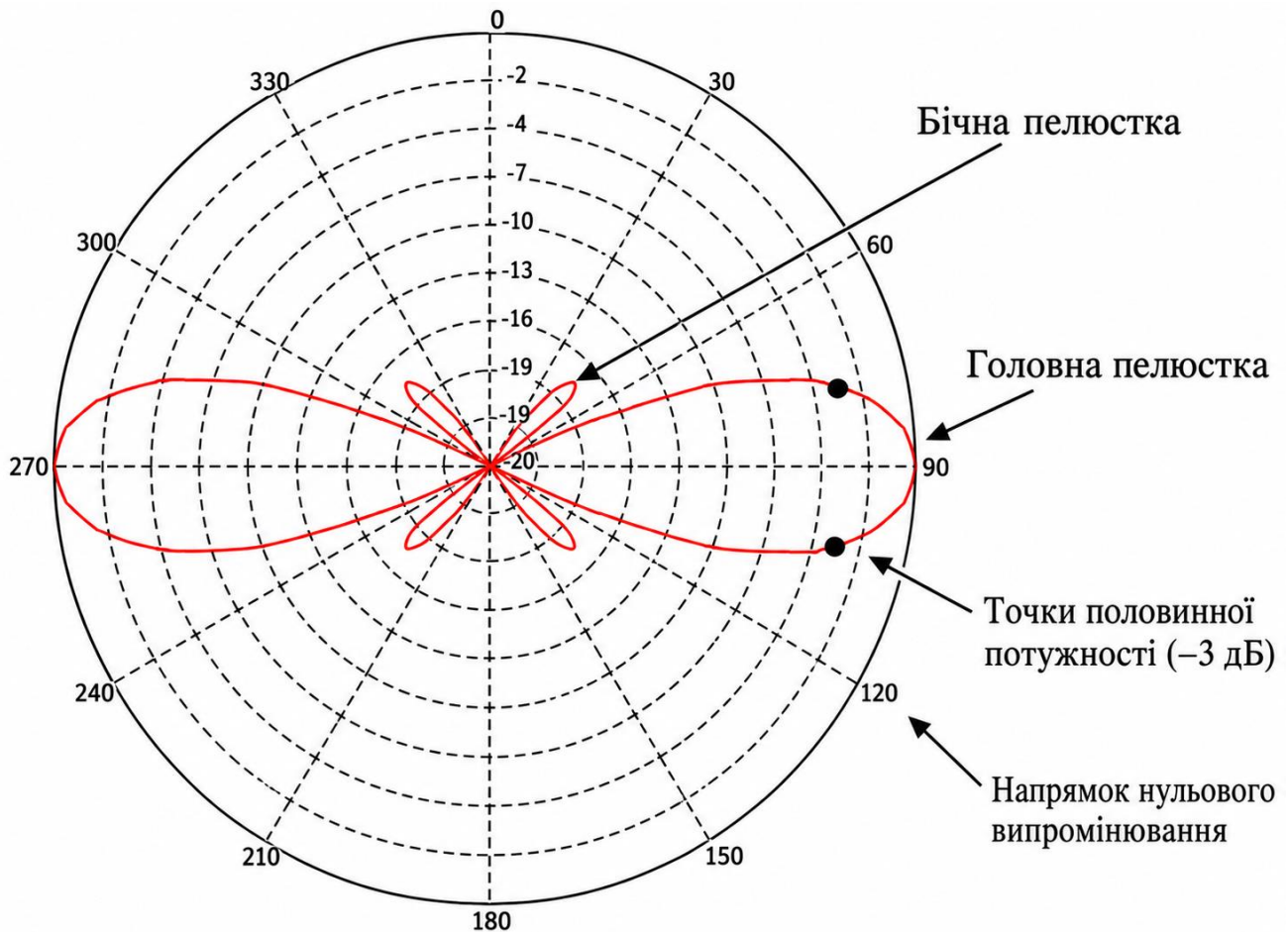


Рисунок 4.2 – Діаграма спрямованості антени

При аналізі передачі сигналу між антенами використовується рівняння Фріса:

$$P_r = P_t G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (4.2)$$

де  $P_t$  – потужність передавача,  $P_r$  – прийнята потужність,  $G_t$  і  $G_r$  – підсилення передавальної та приймальної антен,  $R$  – відстань між ними,  $\lambda$  – довжина хвилі.

У логарифмічній формі це співвідношення дозволяє оцінити втрати у вільному просторі:

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(R) + 20 \log_{10}(f) + 32.44, \quad (4.3)$$

де  $R$  – відстань (км),  $f$  – частота (МГц).

Це означає, що зі збільшенням відстані або частоти рівень сигналу зменшується, що є критично важливим для планування телекомунікаційних систем.

Важливою умовою коректних вимірювань є робота в зоні далекого поля (far-field), де хвильовий фронт можна вважати плоским. Гранична відстань визначається:

$$R > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (4)$$

де  $D$  – максимальний розмір антени.

У ближній зоні (near-field) результати вимірювань можуть бути спотворені через складну структуру поля.

Ще одним важливим аспектом є поляризація антени, яка визначає орієнтацію електричного поля хвилі. Для максимального прийому сигналу поляризації передавальної та приймальної антен повинні збігатися. Невідповідність поляризацій призводить до додаткових втрат.

Під час вимірювання антени важливо враховувати узгодження з лінією передачі, яке характеризується коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ). Погане узгодження призводить до відбиття частини енергії назад у тракт і зменшення ефективності системи.

Крім того, на результати вимірювань значно впливають:

- відбиття сигналу від навколишніх об'єктів,
- перешкоди та завади,
- точність позиціонування антени,
- стабільність джерела сигналу.

При експериментальному визначенні діаграми спрямованості антени використовується метод обертання антени з фіксацією рівня прийнятого сигналу. Отримані дані дозволяють побудувати реальну діаграму спрямованості та оцінити її параметри.

Обладнання. У лабораторній роботі використовується вимірювач потужності радіочастотного сигналу RF Power Meter (версія V7.0 або аналогічний прилад), генератор високочастотних сигналів або передавальна антена з відомими параметрами, досліджувана приймальна антена, коаксіальні кабелі з хвильовим опором 50 Ом, а також, за потреби, атенюатори та узгоджене навантаження. Для забезпечення стабільності вимірювань доцільно застосовувати штатив або механізм фіксації положення антени під час її орієнтації в просторі.

RF Power Meter призначений для вимірювання потужності високочастотного сигналу на вході приладу та відображення її у зручній логарифмічній шкалі, зазвичай

у дБм (рис. 4.3). Принцип роботи базується на перетворенні енергії електромагнітного сигналу в електричний сигнал постійного струму з подальшою цифровою обробкою та індикацією результату. Це дозволяє оцінювати рівень сигналу безпосередньо в точці прийому та використовувати прилад для діагностики телекомунікаційних трактів.



Рисунок 4.3 – Зовнішні вигляд RF-Power Meter-V7.0

Під час роботи з приладом необхідно враховувати, що вимірювання виконуються коректно лише за умови узгодження вхідного тракту, тому всі з'єднання повинні відповідати стандартному хвильовому опору 50 Ом. Будь-яке неузгодження або використання пошкоджених кабелів призводить до відбиттів сигналу та викривлення результатів вимірювання. Перед початком експерименту прилад необхідно увімкнути та переконатися у стабільності показів у відсутності сигналу, що дозволяє оцінити рівень власних шумів.

Особливістю RF Power Meter є залежність точності вимірювання від частоти сигналу та рівня потужності. При роботі в різних діапазонах частот можливі незначні відхилення показів, тому вимірювання слід проводити у межах робочого діапазону приладу. Також необхідно уникати перевантаження входу, оскільки надмірний рівень сигналу може призвести до насичення вимірювального тракту або навіть пошкодження приладу.

Умови вимірювання мають бути максимально стабільними. Важливо забезпечити незмінність положення антен, відсутність сторонніх об'єктів у зоні поширення сигналу та мінімізацію впливу відбиттів від навколишніх поверхонь. Навіть незначні переміщення антен або зміна положення кабелів можуть призводити до помітних змін показів через інтерференцію сигналів.

Під час виконання роботи слід розуміти, що RF Power Meter вимірює не лише потужність, прийняту антеною, а сумарний результат взаємодії передавача, середовища поширення та приймальної системи. Тому інтерпретація результатів повинна враховувати вплив усіх елементів тракту, а не лише характеристик самої антени.

## Хід роботи

1. Перед початком виконання лабораторної роботи необхідно підготувати вимірювальну установку та перевірити справність усіх її елементів. Передавальна антена підключається до генератора високочастотного сигналу, а приймальна антена – до входу RF Power Meter. Якщо в установці використовуються коаксіальні кабелі, потрібно переконаватися в надійності всіх з'єднань та в тому, що роз'єми не мають механічних пошкоджень. Особливу увагу слід звернути на узгодження тракту, оскільки неузгодження може призвести до додаткових втрат і похибок вимірювання.

2. Після складання схеми необхідно ввімкнути генератор сигналу та вимірювач потужності. На генераторі встановлюються значення частоти та рівня сигналу, задані викладачем. Усі подальші вимірювання виконуються при незмінних параметрах генератора, якщо окремим пунктом завдання не передбачено їх зміну. Перед початком основних вимірювань доцільно зафіксувати початкові умови експерименту: частоту сигналу, рівень потужності генератора, тип і марку антен, тип кабелів, відстань між антенами та умови розміщення в просторі.

3. На першому етапі роботи антени встановлюють співвісно, тобто так, щоб напрямок максимального випромінювання передавальної антени збігався з напрямком максимальної чутливості приймальної антени. Поляризації обох антен також повинні збігатися. Це створює умови для отримання максимального рівня прийнятого сигналу. Після встановлення антен на заданій відстані необхідно зняти покази RF Power Meter і записати рівень прийнятої потужності. Це значення використовується як опорне для подальших порівнянь.

4. На другому етапі потрібно дослідити вплив відстані між антенами на рівень прийнятого сигналу. Для цього відстань між передавальною і приймальною антенами послідовно змінюють у межах, заданих викладачем, наприклад 1 м, 2 м, 3 м, 4 м. Для кожного значення відстані фіксують покази вимірювача потужності. Під час вимірювань важливо не змінювати орієнтацію антен і не допускати появи сторонніх об'єктів у зоні між ними, оскільки це може викликати додаткові відбиття й спотворити результати. Після завершення серії вимірювань студент повинен проаналізувати, як зменшується рівень прийнятого сигналу зі збільшенням відстані, та порівняти отриману залежність з теоретичними уявленнями про втрати у вільному просторі.

5. На першому етапі роботи антени встановлюють співвісно, тобто так, щоб напрямок максимального випромінювання передавальної антени збігався з напрямком максимальної чутливості приймальної антени. Поляризації обох антен також повинні збігатися. Це створює умови для отримання максимального рівня прийнятого сигналу. Після встановлення антен на заданій відстані необхідно зняти покази RF Power Meter

і записати рівень прийнятої потужності. Це значення використовується як опорне для подальших порівнянь.

6. На другому етапі потрібно дослідити вплив відстані між антенами на рівень прийнятого сигналу. Для цього відстань між передавальною і приймальною антенами послідовно змінюють у межах, заданих викладачем, наприклад 1 м, 2 м, 3 м, 4 м. Для кожного значення відстані фіксують покази вимірювача потужності. Під час вимірювань важливо не змінювати орієнтацію антен і не допускати появи сторонніх об'єктів у зоні між ними, оскільки це може викликати додаткові відбиття й спотворити результати. Після завершення серії вимірювань студент повинен проаналізувати, як зменшується рівень прийнятого сигналу зі збільшенням відстані, та порівняти отриману залежність з теоретичними уявленнями про втрати у вільному просторі.

7. На третьому етапі необхідно дослідити вплив орієнтації антени на рівень сигналу. Для цього відстань між антенами залишають сталою, а приймальну антену обертають навколо вертикальної або горизонтальної осі з певним кроком, наприклад  $10^\circ$  або  $15^\circ$ . Для кожного кута повороту записують рівень прийнятої потужності. У результаті формується набір експериментальних точок, за якими можна побудувати діаграму спрямованості антени. Під час цього етапу необхідно пояснити, чому максимальний сигнал спостерігається при певному положенні антени і чому при відхиленні від цього положення рівень сигналу зменшується. Якщо діаграма має виражений головний пелюсток і менші за рівнем бічні пелюстки, це потрібно відобразити у звіті.

8. На четвертому етапі доцільно дослідити вплив поляризації. Для цього, не змінюючи відстань між антенами, одну з антен повертають так, щоб її поляризація перестала збігатися з поляризацією другої антени. Наприклад, якщо обидві антени спочатку мали вертикальну поляризацію, одну з них можна повернути на  $90^\circ$ . Після цього знову вимірюють рівень прийнятого сигналу. Отримані результати дозволяють оцінити, наскільки невідповідність поляризацій зменшує ефективність передачі енергії між антенами.

Обробка результатів. Результати подаються у вигляді таблиць:

- залежність потужності від відстані
- залежність потужності від кута

Порівняти виміряну прийнятну потужність із теоретично розрахованою за рівнянням Фріса. Якщо між ними є відмінність, потрібно пояснити її можливі причини.

### **Зміст звіту**

Звіт повинен містити тему та мету роботи, розширені теоретичні відомості, опис експериментальної установки та результати вимірювань.

Необхідно навести таблиці, графіки та діаграму спрямованості антени.

У висновках слід оцінити характеристики антени та пояснити вплив відстані та орієнтації на рівень сигналу.

### **Контрольні запитання**

1. Яке призначення антени в телекомунікаційних системах?
2. Що таке коефіцієнт підсилення антени?
3. Що показує діаграма спрямованості?
4. Як залежить рівень сигналу від відстані?
5. Що таке далеке поле?
6. Як визначити ефективність антени?
7. Які фактори впливають на вимірювання антени?
8. Чому важлива орієнтація антени?

## Лабораторна робота 5

### Дослідження параметрів антен і ліній передачі за допомогою векторного аналізатора мереж

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи векторного аналізатора мереж, навчитися вимірювати коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ), імпеданс антени, визначати її реактивну складову за діаграмою Сміта, а також оцінювати втрати сигналу в кабельних лініях.

#### Теоретичні відомості

Типовий комплект LiteVNA 64 включає сам прилад, коаксіальні кабелі з роз'ємами SMA, калібрувальний набір (Open, Short, Load), а також перехідники (рис. 5.1). Калібрувальні елементи використовуються для усунення похибок вимірювання.



Рисунок 5.1 – Комплект LiteVNA 64

У телекомунікаційних системах передавання сигналу здійснюється через лінії передачі, які характеризуються хвильовим опором  $Z_0$ . Для ефективної передачі енергії необхідно, щоб опір навантаження  $Z_L$  дорівнював хвильовому опору лінії. Такий режим називається узгодженням, і в цьому випадку відбиття сигналу відсутнє.

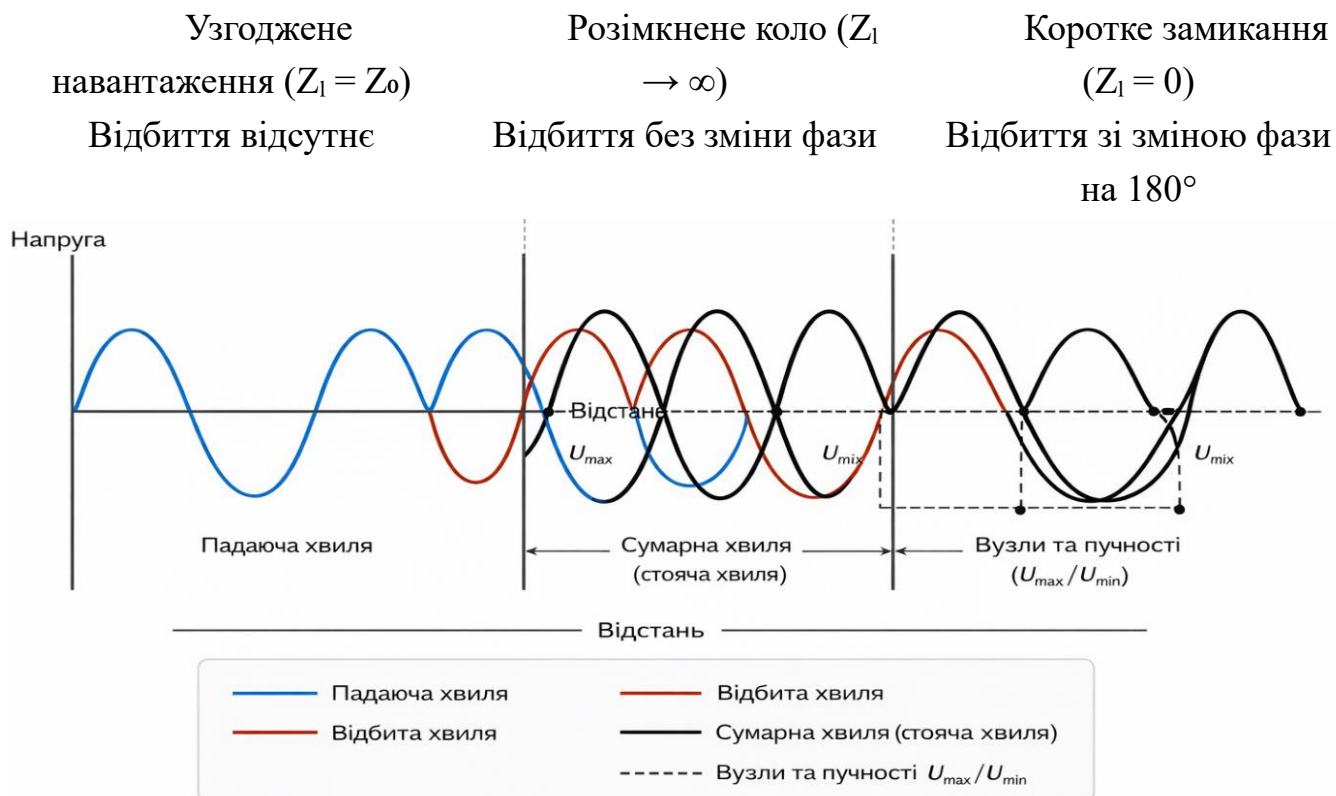


Рисунок 5.2 – Умова виникнення стоячої хвилі

Якщо умова узгодження порушується, частина сигналу відбивається назад до джерела. Це явище називається відбиттям сигналу, і воно призводить до спотворення форми сигналу, втрат енергії та появи стоячих хвиль.

Кількісно відбиття описується коефіцієнтом відбиття:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (5.1)$$

Якщо  $Z_L = Z_0$ , тоді  $\Gamma = 0$  і відбиття відсутнє. Якщо ж навантаження не узгоджене, то  $|\Gamma| > 0$ , і частина сигналу повертається назад.

Важливою характеристикою є коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ):

$$КСХ = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (5.2)$$

При ідеальному узгодженні ( $КСХ = 1$ ), а при сильному неузгодженні значення зростає.

Векторні аналізатори мереж (VNA), такі як LiteVNA 64 або NanoVNA, дозволяють вимірювати так звані S-параметри (scattering parameters), які є основними характеристиками високочастотних пристроїв. Найважливішими з них є:

- $S_{11}$  – коефіцієнт відбиття (узгодження антени або навантаження)
- $S_{21}$  – коефіцієнт передачі (втрати або підсилення в лінії)

Коефіцієнт  $S_{11}$  безпосередньо пов'язаний із коефіцієнтом відбиття:

$$S_{11} = \Gamma. \quad (5.3)$$

Часто  $S_{11}$  виражається в децибелах:

$$S_{11}(dB) = 20 \log_{10} |\Gamma|. \quad (5.4)$$

Менші значення (наприклад,  $-20$  дБ) означають хороше узгодження.

Для оцінювання втрат у кабелі використовується параметр  $S_{21}$ , який показує, яка частина сигналу проходить через лінію:

$$S_{21}(dB) = 20 \log_{10} |U_{вих}/U_{вх}|. \quad (5.5)$$

Від'ємні значення свідчать про затухання сигналу.

Важливим інструментом аналізу є діаграма Сміта, яка дозволяє графічно відображати комплексний імпеданс. Вона базується на відображенні коефіцієнта відбиття на комплексній площині. Кожна точка на діаграмі відповідає певному значенню імпедансу:

$$Z = R + jX, \quad (5.6)$$

де  $R$  – активний опір, а  $X$  – реактивна складова.

Реактивна складова може бути:

- індуктивною ( $X > 0$ ) – точка розташована у верхній частині діаграми
- ємнісною ( $X < 0$ ) – точка знаходиться в нижній частині

Центр діаграми відповідає ідеальному узгодженню ( $Z = Z_0$ ). Віддалення точки від центру показує ступінь неузгодження.

Діаграма Сміта дозволяє не лише визначати імпеданс, але й аналізувати поведінку пристрою в залежності від частоти, що особливо важливо при налаштуванні антен. При зміні частоти точка переміщується по діаграмі, утворюючи траєкторію.

Таким чином, використання VNA дозволяє комплексно оцінити параметри телекомунікаційних систем: ступінь узгодження, втрати в лінії, характер імпедансу та частотні властивості антен і кабелів. Це є критично важливим для проєктування та експлуатації сучасних систем зв'язку.

## Хід роботи

Дослідити параметри антени та кабельної лінії, визначити КСХ, імпеданс та втрати сигналу.

Для виконання практичної роботи використовується векторний аналізатор мереж LiteVNA 64 або NanoVNA, який є основним вимірювальним приладом для дослідження параметрів антен і ліній передачі. До складу обладнання входять коаксіальні кабелі з роз'ємами SMA, що забезпечують підключення досліджуваних об'єктів до портів приладу.

Обов'язковим елементом є калібрувальний набір (Open, Short, Load), який використовується для проведення попереднього калібрування та підвищення точності вимірювань. Для дослідження параметрів антени застосовується реальна антена або її еквівалентне навантаження

1. Перед початком роботи прилад необхідно увімкнути та встановити робочий діапазон частот, заданий викладачем. Вибирається режим вимірювання ( $S_{11}$  для антени або  $S_{21}$  для кабелю). Для коректного відображення результатів необхідно встановити шкалу та формат відображення (SWR, Smith, LogMag).

2. Спочатку необхідно відкалібрувати прилад відповідно до стандартної процедури. Калібрування виконується перед кожним вимірюванням для підвищення точності. Процедура включає послідовне підключення калібрувальних стандартів: Open (розімкнене коло), Short (коротке замикання), Load (узгоджене навантаження 50 Ом). Після цього прилад зберігає калібрування, і можна переходити до вимірювань. Після калібрування до порту  $S_{11}$  підключається антена.

3. Далі встановлюється необхідний частотний діапазон. На екрані обирається режим відображення КСХ. Потрібно визначити мінімальне значення КСХ та відповідну частоту резонансу антени.

4. Після цього слід перейти до режиму діаграми Сміта та визначити імпеданс антени. За положенням точки на діаграмі необхідно оцінити активну складову опору та реактивну складову. Якщо точка знаходиться вище осі – антена має індуктивний характер, якщо нижче – ємнісний.

5. На наступному етапі необхідно дослідити кабель. Для цього використовується режим  $S_{21}$ . Кабель підключається між портами приладу. Потрібно виміряти затухання сигналу в кабелі в заданому діапазоні частот.

### 6. Вимірювання КСХ антени

Визначається за шкалою SWR. Потрібно знайти:

- мінімальне значення КСХ
- робочу частоту антени

7. Вимірювання імпедансу антени здійснюється за діаграмою Сміта. Імпеданс визначається як  $Z=R+jX$ .

8. Вимірювання втрат у кабелі

Втрати визначаються у децибелах  $L=-20\log_{10}|S_{21}|$ . Чим більше значення втрат, тим гірша якість кабелю.

### **Зміст звіту**

Звіт повинен містити тему та мету роботи, теоретичні відомості про КСХ і діаграму Сміта, опис приладу та калібрування. Необхідно навести результати вимірювань КСХ антени, визначений імпеданс, а також графік втрат у кабелі.

У звіті слід проаналізувати якість узгодження антени, пояснити характер імпедансу та оцінити придатність кабелю для використання в телекомунікаційних системах. Завершується робота висновками.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке КСХ і що він характеризує?
2. Як пов'язаний КСХ з коефіцієнтом відбиття?
3. Що показує діаграма Сміта?
4. Як визначити імпеданс антени за діаграмою Сміта?
5. Які етапи калібрування VNA?
6. Що таке параметри  $S_{11}$  і  $S_{21}$ ?
7. Як визначити втрати в кабелі?
8. Чому важливе узгодження антени?

## Лабораторна робота 6

### Дослідження S-параметрів і частотних характеристик пасивних елементів телекомунікаційних трактів за допомогою векторного аналізатора мереж

Мета роботи: ознайомитися з принципами вимірювання S-параметрів пасивних ВЧ-пристроїв, навчитися визначати коефіцієнт передачі та відбиття, дослідити частотні характеристики фільтра, атенюатора або іншого двополюсника та оцінити їх придатність для використання в телекомунікаційних системах.

#### Теоретичні відомості

У високочастотних телекомунікаційних системах аналіз електричних кіл виконується не за допомогою класичних напруг і струмів, а через S-параметри (scattering parameters), які описують поведінку сигналу у вигляді хвиль. Це пов'язано з тим, що на високих частотах вимірювання струмів і напруг є складним, тоді як відбиті та передані хвилі можна точно визначити.

Для двопортового пристрою основними є параметри  $S_{11}$  та  $S_{21}$ . Параметр  $S_{11}$  характеризує відбиття сигналу від входу пристрою і фактично визначає ступінь узгодження. Він пов'язаний із коефіцієнтом відбиття:

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (6.1)$$

Чим менше значення  $|S_{11}|$  тим краще узгодження. У децибелах:

Параметр  $S_{21}$  визначає передачу сигналу через пристрій:

$$S_{21} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (6.2)$$

Якщо  $S_{21}$  від'ємний (наприклад,  $-3$  дБ), це означає втрати сигналу. Якщо додатний – підсилення (для активних пристроїв).

Частотна характеристика пристрою показує залежність передачі сигналу від частоти. Для фільтрів вона має чітко виражені області:

- смуга пропускання (мінімальні втрати),
- перехідна область,
- смуга загасання.

Граничні частоти визначаються за рівнем  $-3$  дБ:

$$K(f) = 0,707 \cdot K_{\text{max}}. \quad (6.3)$$

Смуга пропускання:

$$B=f_6-f_n. \quad (6.4)$$

Для атенюаторів основною характеристикою є рівень ослаблення сигналу, який повинен бути стабільним у широкому частотному діапазоні. Для фільтрів важливою є селективність – здатність пропускати одні частоти та пригнічувати інші.

Таким чином, аналіз S-параметрів дозволяє повністю охарактеризувати поведінку пасивного пристрою в телекомунікаційному тракті.

### Хід роботи

Дослідити частотні характеристики пасивного ВЧ-пристрою та визначити його основні параметри за допомогою S-параметрів.

Обладнання. Векторний аналізатор мереж LiteVNA 64 або NanoVNA, коаксіальні кабелі, калібрувальний набір (Open, Short, Load), досліджуваний пристрій (фільтр, атенюатор, дільник потужності або інший ВЧ-елемент), адаптери та перехідники.

1. На початку необхідно увімкнути аналізатор та задати частотний діапазон вимірювання відповідно до досліджуваного пристрою. Після цього виконується повне калібрування приладу за стандартною процедурою (Open, Short, Load), що дозволяє усунути вплив кабелів і роз'ємів.

2. Далі досліджуваний пристрій підключається між портами аналізатора. На екрані встановлюється режим відображення параметра  $S_{21}$  у децибелах. Поступово аналізується зміна рівня сигналу в залежності від частоти. За графіком визначаються області пропускання та загасання.

3. Після цього слід перейти до вимірювання параметра  $S_{11}$ . За отриманими даними оцінюється узгодження пристрою з лінією передачі.

4. На основі отриманих графіків необхідно визначити:

На основі отриманих графіків необхідно визначити:

- максимальне значення передачі,
- частоти зрізу,
- смугу пропускання,
- рівень загасання,
- якість узгодження.

За можливості результати фіксуються у вигляді скріншотів або таблиць.

## 5. Обробка результатів

На основі вимірних даних будується амплітудно-частотна характеристика пристрою. Визначаються ключові параметри: смуга пропускання, рівень втрат, рівень відбиття.

Аналізується відповідність отриманих результатів теоретичним очікуванням.

### Зміст звіту

Звіт повинен містити тему та мету роботи, розширені теоретичні відомості про S-параметри, опис досліджуваного пристрою та параметрів вимірювання. Необхідно навести графіки  $S_{21}$  та  $S_{11}$ , результати вимірювань та розрахунків.

У звіті слід виконати аналіз частотної характеристики, оцінити якість узгодження та пояснити отримані результати. Завершується робота висновками щодо придатності досліджуваного пристрою для використання в телекомунікаційних системах.

### Контрольні запитання

1. Що таке S-параметри і чому вони використовуються на ВЧ?
2. Що характеризує параметр  $S_{11}$ ?
3. Що показує параметр  $S_{21}$ ?
4. Як визначити смугу пропускання пристрою?
5. Що означає рівень  $-3$  дБ?
6. Як оцінити узгодження пристрою?
7. Які особливості частотної характеристики фільтра?
8. Чим відрізняється фільтр від атенюатора?

## Діагностика кабельних ліній зв'язку за допомогою кабельного тестера

Мета роботи: ознайомитися з принципами контролю фізичного середовища передавання, навчитися використовувати кабельний тестер для виявлення дефектів кабельних ліній, визначати типи пошкоджень і оцінювати якість з'єднання без втручання в структуру мережі.

### Теоретичні відомості

Кабельний тестер є базовим інструментом діагностики фізичного середовища передавання в телекомунікаційних системах (рис. 7.1). Його використання дозволяє швидко оцінити стан кабельної інфраструктури без необхідності демонтажу кабелю або зупинки роботи мережі. Це особливо важливо для локальних мереж, систем передачі даних та телекомунікаційних вузлів.



Рисунок 7.1 – Кабельний тестер

У процесі передачі сигналу по кабелю можливі різні дефекти, які погіршують якість зв'язку або повністю порушують передачу даних. До таких дефектів належать обрив провідника, коротке замикання, неправильне підключення жил (перехресні пари), порушення контакту, а також часткові пошкодження ізоляції. Всі ці дефекти змінюють електричні параметри лінії, що можна виявити за допомогою тестера.

Принцип роботи кабельного тестера базується на подачі тестового сигналу в кабель та аналізі відповіді. У простих тестерах виконується перевірка цілісності та правильності розводки провідників. У більш складних приладах використовується

метод рефлектометрії у часовій області (TDR), який дозволяє визначити місце пошкодження кабелю за часом повернення відбитого сигналу (рис. 7.2).

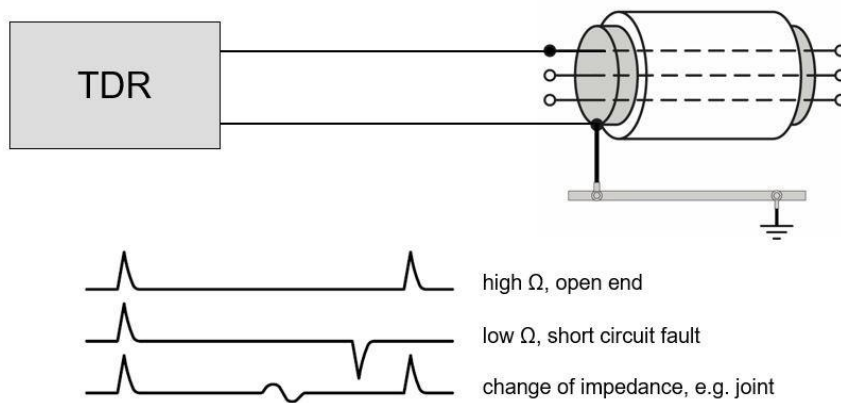


Рисунок 7.2 – Метод рефлектометрії у часовій області

Відбиття сигналу виникає у місцях зміни імпедансу кабелю. Наприклад, при обриві або короткому замиканні коефіцієнт відбиття змінюється, і тестер реєструє цей сигнал. Відстань до місця пошкодження визначається за формулою:

$$l = v \cdot t / 2, \quad (7.1)$$

де  $l$  – відстань до дефекту,  $v$  – швидкість поширення сигналу в кабелі,  $t$  – час затримки відбитого сигналу.

Для мідних кабелів (витої пари) також важливими параметрами є правильність розводки контактів (стандарти T568A/T568B), відсутність перехресних пар та надійність контактів. Для оптичних кабелів використовується аналогічний принцип (OTDR), але з використанням світлових імпульсів.

Таким чином, кабельний тестер дозволяє швидко і точно визначити стан кабельної лінії, локалізувати пошкодження та оцінити придатність середовища для передачі сигналів.

### Хід роботи

Дослідити кабельні лінії різного стану, визначити типи дефектів та оцінити якість фізичного середовища передачі сигналу.

Обладнання. Кабельний тестер (для витої пари або універсальний), набір кабелів (UTP/STP), з'єднувальні роз'єми RJ-45, тестові кабелі з відомими дефектами (обрив, коротке замикання, неправильне підключення), за можливості – кабель з невідомим пошкодженням.

1. На початку роботи необхідно ознайомитися з будовою кабельного тестера та його режимами роботи. Після цього слід підключити справний кабель до тестера та виконати перевірку. Отримані результати використовуються як еталон.

2. Далі необхідно послідовно підключати кабелі з різними дефектами. Для кожного випадку потрібно визначити тип несправності, проаналізувавши індикацію тестера або його дисплей.

3. У разі використання тестера з функцією визначення довжини кабелю або TDR необхідно визначити приблизну відстань до пошкодження.

4. Після цього студентам пропонується кабель з невідомим дефектом. Необхідно самостійно визначити тип пошкодження та пояснити отримані результати.

Необхідно визначити: наявність або відсутність обриву, коротке замикання, правильність розводки провідників, тип дефекту, (за можливості) відстань до пошкодження

#### 5. Обробка результатів

Результати вимірювань оформлюються у вигляді таблиці, де вказується тип кабелю, очікуваний стан, покази тестера та визначений дефект.

Потрібно порівняти результати вимірювань з реальним станом кабелю та оцінити точність діагностики.

### **Зміст звіту**

Звіт повинен містити тему та мету роботи, теоретичні відомості про принцип роботи кабельного тестера, опис обладнання та проведених вимірювань. Необхідно навести результати перевірки кабелів, визначені дефекти та їх аналіз.

У звіті слід пояснити принцип виявлення кожного типу пошкодження та оцінити ефективність використання кабельного тестера в телекомунікаційних системах. Завершується робота висновками.

### **Контрольні запитання**

1. Яке призначення кабельного тестера?
2. Які типи дефектів можуть виникати в кабелях?
3. У чому полягає принцип роботи кабельного тестера?
4. Що таке TDR і як він використовується?
5. Як визначається відстань до пошкодження?
6. Чим відрізняється обрив від короткого замикання?
7. Що таке перехресні пари?
8. Чому важлива правильна розводка кабелю?

## Лабораторна робота 8

### Аналіз мережевого трафіку на канальному рівні за допомогою Wireshark

Мета роботи: ознайомитися зі структурою кадрів канального рівня, навчитися виконувати захоплення та аналіз мережевого трафіку, дослідити MAC-адресацію, ARP-протокол та типи кадрів Ethernet.

#### Теоретичні відомості

Канальний рівень моделі OSI забезпечує передачу даних між вузлами, які знаходяться в одній фізичній мережі. Основною одиницею передачі на цьому рівні є кадр (frame). У мережах Ethernet кадр містить службову інформацію, необхідну для адресації та контролю цілісності даних.

Структура Ethernet-кадру включає MAC-адресу отримувача, MAC-адресу відправника, поле типу протоколу, поле даних та контрольну суму (CRC) (рис. 8.1). MAC-адреса є унікальним ідентифікатором мережевого інтерфейсу і використовується для доставки кадру в межах локальної мережі.

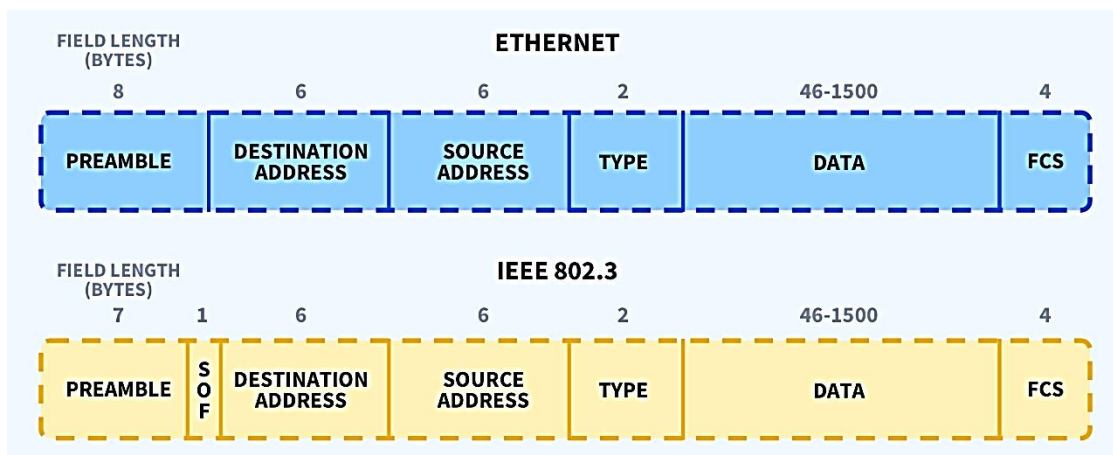


Рисунок 8.1 – Структура Ethernet-кадру

Передача кадрів може здійснюватися у трьох режимах:

унікаст (один-до-одного), широкомовний режим (broadcast) та мультикаст. Broadcast-кадри використовуються для звернення до всіх пристроїв у мережі, наприклад, у протоколі ARP.

Протокол ARP (Address Resolution Protocol) використовується для визначення відповідності між IP-адресою та MAC-адресою. Коли пристрій хоче передати дані іншому вузлу, він спочатку надсилає ARP-запит у вигляді широкомовного кадру. Відповідний вузол надсилає ARP-відповідь із своєю MAC-адресою.

Програма Wireshark дозволяє перехоплювати та аналізувати мережеві пакети в реальному часі. Вона відображає структуру кадру, дозволяє фільтрувати трафік та

досліджувати окремі поля (рис. 8.2). Це робить її одним із основних інструментів діагностики мереж на каналному рівні.

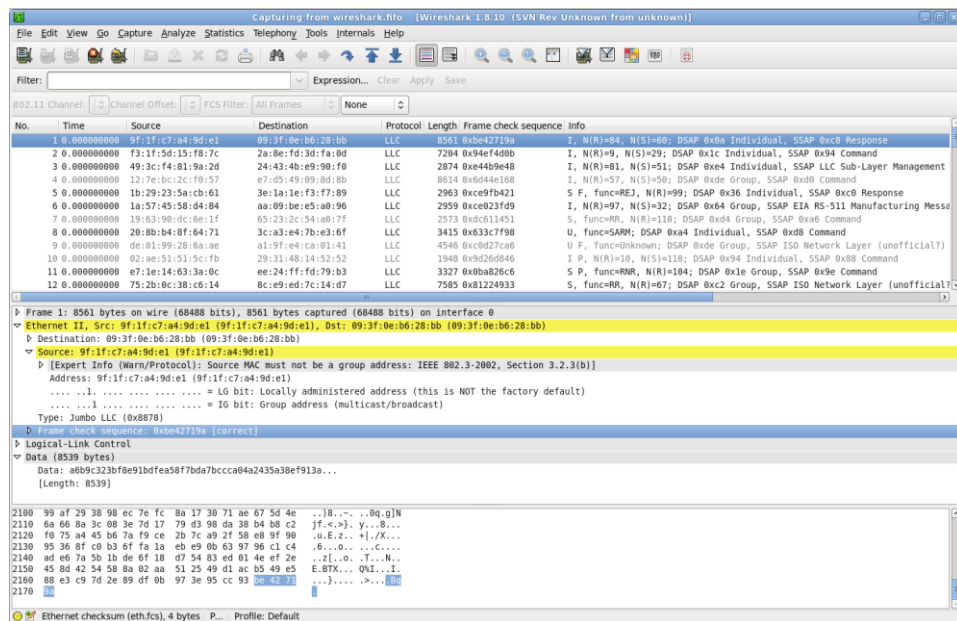


Рисунок 8.2 – Вікно програми Wireshark

Під час аналізу важливо звертати увагу на:

тип кадру, MAC-адреси, протокол верхнього рівня, довжину кадру та службові поля. Це дозволяє визначити характер трафіку та можливі проблеми в мережі.

## Хід роботи

Виконати захоплення мережевого трафіку, проаналізувати кадри Ethernet, дослідити роботу ARP-протоколу та визначити типи передачі кадрів.

Обладнання / програмне забезпечення. Персональний комп'ютер з доступом до локальної мережі та встановленою програмою Wireshark.

1. Перед початком роботи необхідно переконатися, що на комп'ютері встановлено програму Wireshark та є активне мережеве підключення (Ethernet або Wi-Fi). Після цього запустити програму Wireshark.

2. Після запуску на головному екрані програми відобразиться список доступних мережевих інтерфейсів. Необхідно уважно визначити активний інтерфейс (як правило, він має найбільшу активність у вигляді графіка). Обрати цей інтерфейс подвійним натисканням або кнопкою «Start capturing packets».

3. Після запуску захоплення пакетів на екрані почне відображатися мережевий трафік у реальному часі. Для формування достатньої кількості даних необхідно створити мережеву активність. Для цього слід відкрити будь-який веб-сайт у браузері або виконати команду ping до відомого ресурсу (наприклад, 8.8.8.8).

4. Після накопичення трафіку (через 20–30 секунд) необхідно зупинити захоплення пакетів, натиснувши кнопку «Stop».

5. Виконується аналіз отриманих даних. У верхній частині вікна відображається список кадрів. Необхідно вибрати будь-який кадр і розглянути його структуру в середній частині вікна. Особливу увагу слід звернути на розділ «Ethernet II», де відображаються MAC-адреси відправника та отримувача, а також тип протоколу.

6. На наступному етапі потрібно навчитися використовувати фільтри. У рядку фільтра необхідно ввести:

eth

та натиснути Enter. Це дозволить відобразити лише Ethernet-кадри.

7. Після цього необхідно знайти та проаналізувати ARP-трафік. Для цього у рядку фільтра вводиться:

arp

8. У списку пакетів потрібно знайти ARP-запит (Request) і ARP-відповідь (Reply). Необхідно вибрати ці пакети та визначити IP-адресу відправника і отримувача, MAC-адресу пристроїв та тип повідомлення.

9. Далі потрібно визначити типи передачі кадрів. Для цього аналізується MAC-адреса отримувача:

- якщо вона має значення FF:FF:FF:FF:FF:FF – це широкомовний кадр (broadcast);
- якщо адреса конкретна – це унікаст;
- якщо адреса починається з певних групових значень – це мультикаст.

10. На наступному етапі необхідно дослідити один кадр детально. Потрібно розгорнути всі його поля та визначити: MAC-адреси, тип протоколу, довжину кадру та вкладені протоколи. Також необхідно переглянути вміст кадру у вигляді байтів (нижня частина вікна).

11. Далі навчитися використовувати комбіновані фільтри. Наприклад:

eth.addr == XX:XX:XX:XX:XX:XX

де замість XX підставити власну MAC-адресу. Це дозволить відфільтрувати трафік конкретного пристрою.

12. У завершальній частині роботи необхідно виконати узагальнення отриманих результатів. Потрібно визначити, які типи кадрів переважають у мережі, як працює ARP-протокол та як відбувається передача даних на каналному рівні.

### Зміст звіту

Звіт повинен містити тему та мету роботи, теоретичні відомості про каналний рівень та Ethernet-кадри, опис програмного забезпечення та виконаних дій.

Обов'язково необхідно додати скріншоти Wireshark із прикладами:

Ethernet-кадру

ARP-запиту

ARP-відповіді

У звіті потрібно проаналізувати структуру кадрів, пояснити роботу ARP-протоколу та визначити типи передачі кадрів.

Завершується звіт висновками щодо роботи канального рівня в локальній мережі.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке канальний рівень і які його функції?
2. Що таке Ethernet-кадр?
3. Які поля містить кадр Ethernet?
4. Що таке MAC-адреса?
5. Які існують типи передачі кадрів?
6. Що таке ARP і для чого він використовується?
7. Як працює Wireshark?
8. Які фільтри використовуються для аналізу трафіку?

## Моніторинг якості Wi-Fi мережі

Мета роботи: оцінити рівень сигналу, завади, зайнятість каналів та їх вплив на якість бездротового зв'язку, навчитися використовувати програмні засоби для аналізу параметрів Wi-Fi мереж.

### Теоретичні відомості

Wi-Fi мережі працюють у безліцензійних частотних діапазонах, найпоширенішими з яких є 2,4 ГГц та 5 ГГц. У діапазоні 2,4 ГГц канали перекриваються між собою, що може призводити до взаємних завад. Найменш зашумленими вважаються канали 1, 6 і 11, оскільки вони не перекриваються.

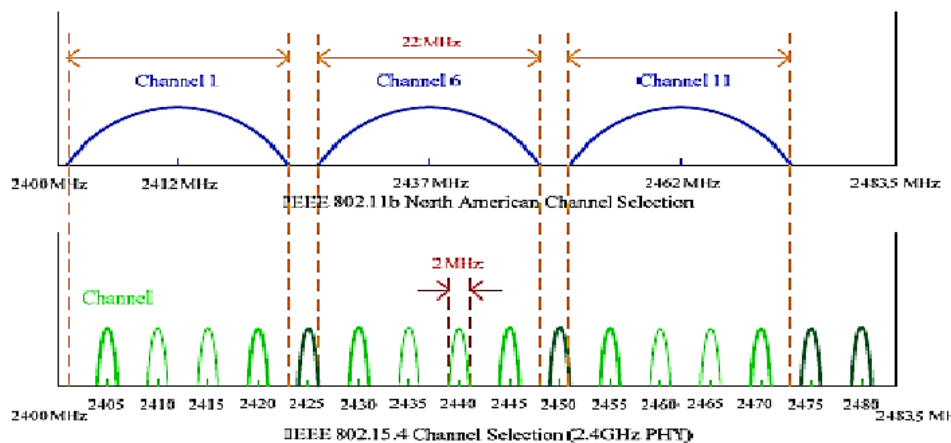


Рисунок 9.1 – Канали в діапазоні 2,4 ГГц

Якість Wi-Fi сигналу визначається рівнем потужності сигналу, який зазвичай вимірюється в дБм. Чим ближче значення до 0 (наприклад,  $-40$  дБм), тим сильніший сигнал. Значення нижче  $-70$  дБм можуть призводити до нестабільного зв'язку.

Важливим фактором є також рівень шуму та співвідношення сигнал/шум (SNR). Чим вище SNR, тим краща якість передачі даних. Наявність великої кількості точок доступу на одному або сусідніх каналах створює завади, що знижують швидкість і стабільність з'єднання.

Аналізатори Wi-Fi дозволяють візуалізувати розподіл мереж по каналах, оцінити рівень сигналу, визначити перевантажені канали та обрати оптимальні параметри мережі.

Таким чином, правильний вибір каналу та розташування точки доступу є ключовими для забезпечення якісного бездротового зв'язку.

## Хід роботи

Дослідити доступні Wi-Fi мережі, визначити рівень сигналу, зайнятість каналів та оцінити якість бездротового середовища.

Обладнання / програмне забезпечення. Персональний комп'ютер або смартфон із модулем Wi-Fi та встановленим програмним забезпеченням: inSSIDer або WiFi Analyzer.

1. Перед початком роботи необхідно увімкнути Wi-Fi модуль на пристрої та запустити програму аналізу мереж (inSSIDer або WiFi Analyzer). Після запуску програми потрібно виконати сканування доступних Wi-Fi мереж. На екрані відобразиться список мереж із параметрами: SSID (назва мережі), рівень сигналу (RSSI), канал та частота.

2. На першому етапі необхідно визначити мережу з найсильнішим сигналом. Для цього аналізується значення RSSI у дБм. Отримані значення необхідно записати та порівняти.

3. Далі необхідно перейти до графічного відображення каналів. На графіку видно розподіл мереж по частотах. Потрібно визначити, які канали найбільш завантажені та чи перекриваються вони.

4. Після цього необхідно визначити оптимальний канал для роботи мережі. Для цього обирається канал з мінімальною кількістю сусідніх мереж та найменшим рівнем завад.

5. На наступному етапі потрібно змінити положення пристрою (наприклад, відійти на кілька метрів або перейти в інше приміщення) та повторити вимірювання. Це дозволить оцінити вплив відстані та перешкод на рівень сигналу.

6. Далі необхідно порівняти параметри мереж у діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц (за наявності). Потрібно визначити, який діапазон забезпечує кращу якість сигналу.

7. У завершальній частині роботи необхідно зробити узагальнення отриманих результатів та сформулювати рекомендації щодо покращення якості Wi-Fi мережі.

### 8. Обробка результатів

Результати вимірювань оформлюються у вигляді таблиці, де вказується назва мережі, канал, рівень сигналу та частота.

Потрібно проаналізувати:

- які канали перевантажені
- які мережі створюють найбільші завади
- як змінюється сигнал з відстанню.

### **Зміст звіту**

Звіт повинен містити тему та мету роботи, теоретичні відомості про Wi-Fi мережі, опис використаного програмного забезпечення та результати вимірювань.

Обов'язково додаються скріншоти програми з аналізом каналів і рівня сигналу.

У звіті необхідно виконати аналіз отриманих даних, визначити оптимальний канал та пояснити вплив завад на якість зв'язку.

Завершується звіт висновками та рекомендаціями щодо оптимізації Wi-Fi мережі.

### **Контрольні запитання**

1. У яких діапазонах працює Wi-Fi?
2. Що таке рівень сигналу (RSSI)?
3. Що означає значення  $-40$  дБм і  $-80$  дБм?
4. Чому канали в діапазоні 2,4 ГГц перекриваються?
5. Які канали є оптимальними?
6. Що таке завади в Wi-Fi мережі?
7. Як відстань впливає на сигнал?
8. Як покращити якість Wi-Fi мережі?

## Лабораторна робота 10

### **Моделювання та діагностика телекомунікаційної мережі на фізичному і каналному рівнях у Cisco Packet Tracer**

Мета роботи: ознайомитися з методами діагностики телекомунікаційних мереж у середовищі моделювання, навчитися виявляти несправності фізичного та каналного рівнів, аналізувати передачу кадрів Ethernet, роботу ARP, MAC-таблиць комутаторів та оцінювати якість функціонування мережі.

#### **Теоретичні відомості**

У телекомунікаційних мережах фізичний та каналний рівні є базовими рівнями, від правильного функціонування яких залежить робота всієї мережевої інфраструктури. Фізичний рівень забезпечує передачу сигналів по середовищу (кабель, радіоканал), тоді як каналний рівень відповідає за формування кадрів, адресацію, контроль доступу до середовища та виявлення помилок.

У мережах Ethernet дані передаються у вигляді кадрів (Ethernet frame). Кожен кадр містить MAC-адресу відправника та отримувача, що дозволяє здійснювати адресну доставку в межах локальної мережі. MAC-адреса є унікальним ідентифікатором мережевого інтерфейсу і записується у вигляді шести байтів (наприклад, 00:1A:2B:3C:4D:5E).

Передача кадрів у мережі може здійснюватися в трьох режимах: унікас (передача одному вузлу), широкомовний режим (broadcast, передача всім вузлам) та мультикаст. Broadcast-кадри відіграють важливу роль у роботі мережі, зокрема при використанні протоколу ARP.

Протокол ARP (Address Resolution Protocol) використовується для визначення MAC-адреси за відомою IP-адресою. Якщо вузол не знає MAC-адресу отримувача, він надсилає широкомовний ARP-запит. Усі пристрої мережі отримують цей запит, але відповідає лише той вузол, якому належить відповідна IP-адреса. ARP-відповідь передається унікасом і містить потрібну MAC-адресу.

Комутатори (switch) працюють на каналному рівні та виконують інтелектуальну передачу кадрів. Основою їх роботи є таблиця MAC-адрес (MAC Address Table), яка містить відповідність між MAC-адресами та портами комутатора. Комутатор запам'ятовує MAC-адреси, які надходять на його порти, у процесі, що називається «навчання» (learning).

Якщо комутатор отримує кадр і знає MAC-адресу отримувача, він передає його лише на відповідний порт (forwarding). Якщо ж адреса невідома, кадр передається на

всі порти, окрім вхідного (flooding). Це важливий механізм, який можна спостерігати під час моделювання.

Cisco Packet Tracer є навчальним середовищем, яке дозволяє моделювати роботу реальних телекомунікаційних мереж (рис. 10.1). Однією з ключових можливостей є Simulation Mode, який дозволяє покроково відстежувати рух пакетів у мережі. У цьому режимі студент може бачити, як формується кадр, як він передається між пристроями, які протоколи використовуються та як працює ARP.

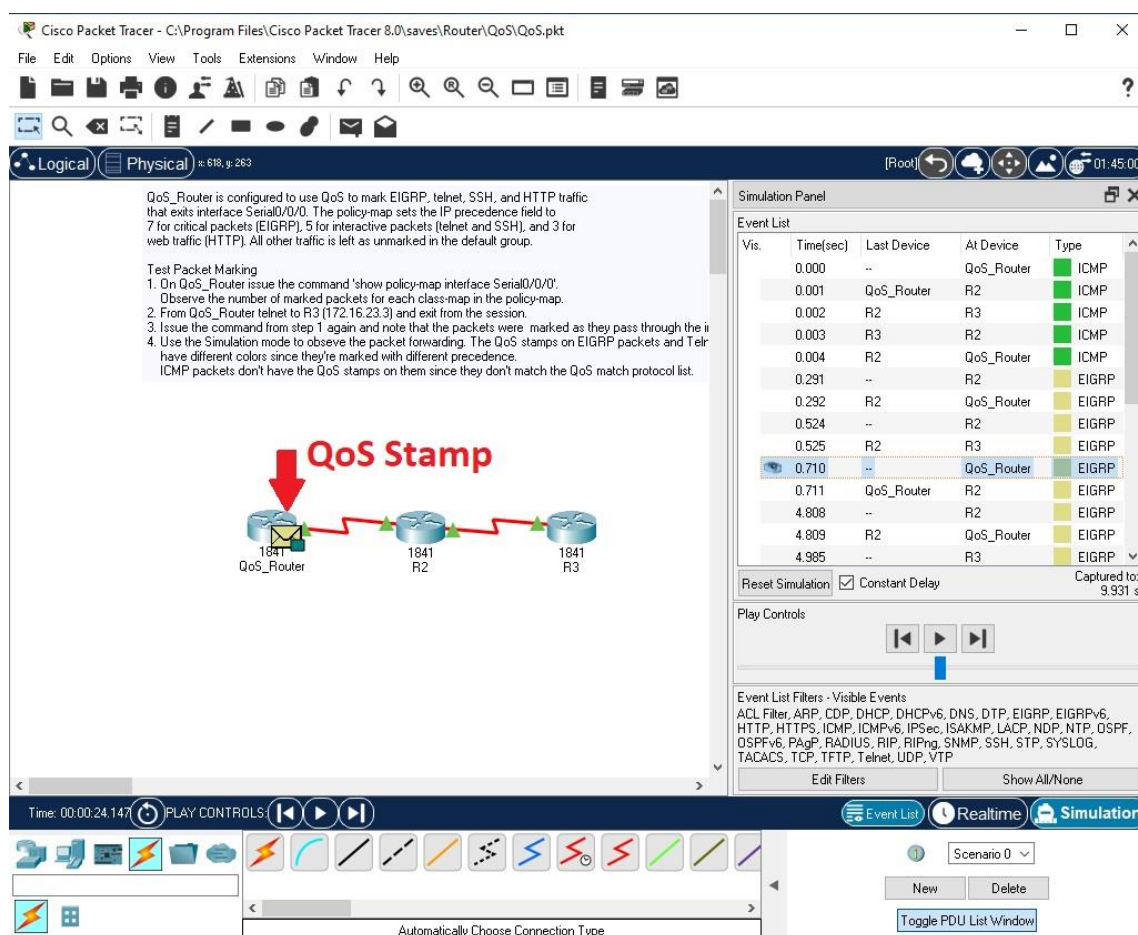


Рисунок 10.1 – Вікно програми Cisco Packet Tracer

Кожен пакет у Simulation Mode можна детально дослідити. При цьому відображається інформація про:

- рівні моделі OSI, через які проходить пакет
- тип протоколу (ARP, ICMP, Ethernet)
- MAC- та IP-адреси
- напрямок руху

Це дозволяє не лише спостерігати роботу мережі, але й виконувати її діагностику.

Діагностика мережі передбачає виявлення несправностей та визначення їх причин. На фізичному рівні проблеми можуть бути пов'язані з кабелями або портами, тоді як на каналному рівні – з адресацією, конфігурацією або роботою протоколів.

Типові ознаки несправностей:

- відсутність відповіді на ping
- відсутність MAC-адрес у таблиці комутатора
- постійна передача broadcast-трафіку
- неправильні IP-адреси

Cisco Packet Tracer дозволяє створювати такі ситуації штучно та навчитися їх аналізувати.

### **Хід роботи**

Обладнання / програмне забезпечення. Персональний комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням Cisco Packet Tracer (безкоштовний для студентів Cisco Networking Academy).

Перед початком виконання лабораторної роботи необхідно запустити програму Cisco Packet Tracer та створити новий проєкт. Рекомендується одразу зберегти файл із зрозумілою назвою для подальшого редагування.

#### **1. Створення мережевої топології**

У нижній частині вікна програми необхідно перейти до розділу «End Devices» та додати на робоче поле три персональні комп'ютери (PC). Після цього в розділі «Network Devices» → «Switches» обрати комутатор (наприклад, 2960) та також розмістити його на полі.

Далі потрібно з'єднати пристрої. Для цього обрати тип кабелю «Copper Straight-Through» та підключити кожен комп'ютер до комутатора через відповідні порти (FastEthernet). Важливо перевірити, щоб після підключення індикатори портів стали зеленими, що свідчить про активне з'єднання.

#### **2. Налаштування IP-адрес**

На кожному комп'ютері необхідно відкрити вкладку «Desktop» → «IP Configuration» та вручну задати IP-адреси:

- PC1: 192.168.1.1
- PC2: 192.168.1.2
- PC3: 192.168.1.3

Маска підмережі для всіх пристроїв: 255.255.255.0

Після введення даних потрібно закрити вікно налаштувань.

#### **3. Перевірка базової працездатності мережі**

На одному з комп'ютерів (наприклад, PC1) відкрити «Desktop» → «Command Prompt» та виконати команду:

ping 192.168.1.2

Аналогічно перевірити зв'язок з іншими комп'ютерами.

Якщо відповіді не надходять, необхідно перевірити правильність IP-адрес та підключення кабелів.

#### 4. Перехід у режим Simulation

У нижній частині інтерфейсу необхідно переключитися з режиму «Realtime» у режим «Simulation». Це дозволить спостерігати процес передачі пакетів у мережі.

Після цього натиснути кнопку «Edit Filters» та залишити активними протоколи ARP та ICMP для зручності аналізу.

#### 5. Аналіз роботи ARP

Очистити список подій за допомогою кнопки «Reset Simulation». Знову виконати команду ping між комп'ютерами.

У вікні Simulation буде видно:

- ARP-запит (broadcast)
- ARP-відповідь
- передачу ICMP-пакетів

Необхідно натискати кнопку «Capture/Forward» для покрокового аналізу передачі пакетів.

Для кожного пакета потрібно відкрити деталі та звернути увагу на:

- MAC-адресу джерела і призначення
- IP-адреси
- тип протоколу

#### 6. Дослідження роботи комутатора

Відкрити комутатор та перейти до вкладки «CLI» або «Config». Переглянути таблицю MAC-адрес.

Потрібно пояснити:

- як комутатор «запам'ятовує» адреси
- чому при першій передачі використовується broadcast
- як змінюється поведінка мережі після навчання

#### 7. Аналіз типів передачі кадрів

У режимі Simulation необхідно визначити:

- які пакети є broadcast
- які – unicast

Для цього потрібно звернути увагу на MAC-адресу отримувача.

#### 8. Діагностика несправностей

На цьому етапі необхідно штучно створити помилки та дослідити їх вплив:

Варіант 1: відключити кабель між одним із ПК і комутатором

Варіант 2: змінити IP-адресу на неправильну

Варіант 3: підключити кабель до неправильного порту

Після кожної зміни необхідно:

- виконати ping
- проаналізувати результат
- визначити причину несправності

## 9. Відновлення мережі

Усунути всі створені помилки та переконатися, що мережа працює коректно.

Знову виконати ping між усіма пристроями.

## Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен бути оформлений акуратно та логічно структурований. На початку необхідно вказати тему та мету роботи. Далі наводяться теоретичні відомості, які коротко відображають принципи роботи фізичного та канального рівнів, особливості Ethernet, ARP та функціонування комутаторів.

У наступному розділі подається схема змодельованої мережі, створеної в середовищі Cisco Packet Tracer. Схема повинна бути зрозумілою, з підписами пристроїв та їх основних параметрів.

Далі необхідно описати хід виконання роботи із зазначенням основних етапів: створення топології, налаштування IP-адрес, перевірка зв'язку, аналіз роботи ARP, дослідження MAC-таблиці комутатора та діагностика несправностей.

Обов'язковою частиною звіту є результати дослідження. У цьому розділі необхідно навести:

- скріншоти мережевої топології;
- приклади передачі пакетів у режимі Simulation;
- ARP-запит і ARP-відповідь;
- фрагмент MAC-таблиці комутатора.

Для кожного зображення необхідно дати коротке пояснення.

У розділі аналізу результатів студент повинен пояснити, як відбувається передача кадрів у мережі, як працює ARP-протокол, яким чином комутатор визначає напрямки передачі та як змінюється робота мережі при виникненні несправностей.

Окремо необхідно описати виявлені помилки (створені під час роботи), пояснити їх причини та способи усунення.

Завершується звіт висновками, у яких студент формулює основні результати роботи, робить узагальнення щодо процесів передачі даних на канальному рівні та оцінює отримані практичні навички.

### **Контрольні запитання**

1. Які типи передачі кадрів існують у мережі Ethernet?
2. Поясніть принцип роботи протоколу ARP.
3. Як комутатор формує таблицю MAC-адрес?
4. Що таке flooding і коли він використовується?
5. Як працює режим Simulation у Cisco Packet Tracer?
6. Які основні причини відсутності зв'язку в локальній мережі?
7. Як визначити несправність фізичного рівня?
8. Як визначити помилки на канальному рівні?
9. Які дії необхідно виконати для діагностики мережі?

## Список рекомендованих джерел

1. Briscoe B. (ed.), De Schepper K., Bagnulo M., White G. Low Latency, Low Loss, and Scalable Throughput (L4S) Internet Service: Architecture. RFC 9330. IETF, 2023. DOI: 10.17487/RFC9330.
2. Custura A., Fairhurst G., Secchi R. Considerations for Assigning a New Recommended Differentiated Services Code Point (DSCP). RFC 9435. IETF, 2023. DOI: 10.17487/RFC9435.
3. European Telecommunications Standards Institute. 5G; System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 18.11.0 Release 18). ETSI TS 123 501 V18.11.0 (2025-09). Sophia Antipolis : ETSI, 2025.
4. European Telecommunications Standards Institute. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); Best practices of testing the performance of web content delivery. ETSI TR 103 733 V1.1.1 (2022-03). Sophia Antipolis : ETSI, 2022.
5. International Telecommunication Union. 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON). Recommendation ITU-T G.9807.1 (02/2023). Geneva : ITU, 2023.
6. International Telecommunication Union. Guidelines on regulatory aspects of quality of service. Supplement 9 to ITU-T E.800-series Recommendations (10/2021). Geneva : ITU, 2021.
7. International Telecommunication Union. Video quality assessment of streaming services over reliable transport for resolutions up to 4K. Recommendation ITU-T P.1204 (10/2025). Geneva : ITU, 2025.
8. Morton A., Geib R., Ciavattone L. Metrics and Methods for One-Way IP Capacity. RFC 9097. IETF, 2021. DOI: 10.17487/RFC9097.
9. Peterson L. L., Davie B. S. Computer Networks: A Systems Approach. 6th ed. Morgan Kaufmann, 2021. 848 p.
10. Про затвердження Методики вимірювання параметрів якості та розрахунку показників якості електронних комунікаційних послуг у мережах мобільного зв'язку при здійсненні моніторингу якості електронних комунікаційних послуг : постанова НКЕК від 18.09.2024 № 493. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 17.10.2024 за № 1571/42916.

I - 74 Інструментальне вимірювання та діагностика в телекомунікаціях. Методичні вказівки до практичних занять 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. 52 с.

Комп'ютерний набір  
Редактор

Наталія ЯКИМЧУК  
Наталія ЯКИМЧУК

Підп. до друку «\_\_»\_\_\_\_\_2026 р.  
Формат 60x84/16. 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