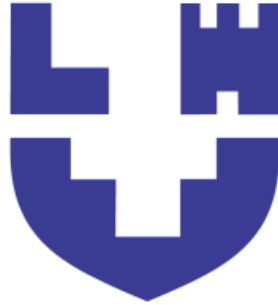


Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет



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
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.
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. 50 с.

Видання містить виклад основних теоретичних відомостей та завдання для виконання на практичних заняттях для засвоєння курсу «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
Практична робота 1. Аналіз частотних параметрів сигналів у телекомунікаційних системах.....	5
Практична робота 2. Аналіз фазових параметрів сигналів у телекомунікаційних системах.....	8
Практична робота 3. Аналіз параметрів узгодження, затухання та якості сигналу в телекомунікаційних каналах.....	11
Практична робота 4. Аналіз завад та перешкодозахищеності телекомунікаційних каналів.....	15
Практична робота 5. Аналіз спектральних параметрів сигналів у телекомунікаційних системах.....	19
Практична робота 6. Визначення коефіцієнта помилок і статистичне оцінювання перешкодозахищеності цифрового каналу.....	22
Практична робота 7. Аналіз параметрів цифрових каналів за результатами вимірювань.....	26
Практична робота 8. Аналіз норм якості цифрових телекомунікаційних систем	30
Практична робота 9. Вимірювання та аналіз S-параметрів телекомунікаційних трактів.....	34
Практична робота 10. Аналіз параметрів потужності радіоканалу за результатами вимірювань.....	39
Практична робота 11. Оцінювання якості сигналу за модуляційними параметрами.....	42
Практична робота 12. Розрахунок радіопокриття за результатами вимірювань	45
Список рекомендованих джерел.....	49

Вступ

Сучасні телекомунікаційні мережі повинні забезпечувати не лише передавання даних, а й передбачувану якість роботи різних цифрових послуг. Голосовий зв'язок, відеоконференції, потокове відео, інтерактивні застосунки та передавання великих обсягів даних мають різні вимоги до затримки, її варіації, втрат пакетів і доступної пропускну здатності. Тому практична підготовка з питань якості обслуговування має поєднувати вимірювання мережевих параметрів, аналіз трафіку, розуміння механізмів перевантаження та керування ресурсами, а також оцінювання впливу мережевих порушень на якість конкретних послуг.

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «QoS телекомунікаційних мереж» спрямовані на формування у студентів навичок експериментального дослідження, аналізу та інженерної інтерпретації параметрів якості мережі. Послідовність робіт побудована за принципом поступового ускладнення: від дослідження маршруту передавання даних, затримки та фактичної швидкості Інтернет-з'єднання до аналізу пакетів і потоків, дослідження перевантаження та черг, механізмів керування трафіком, диференційованого обслуговування, діагностики мереж доступу, оцінювання якості користувацьких послуг і перевірки виконання встановлених вимог.

Практичні роботи виконуються із застосуванням доступних програмних засобів і типових інструментів мережевої діагностики: ping, tracert/traceroute, iPerf3, Wireshark, браузерних засобів вимірювання параметрів Інтернет-з'єднання, Microsoft Excel. Частина завдань побудована на готових навчальних наборах даних і діагностичних сценаріях, що дає змогу досліджувати явища, які складно або недоцільно відтворювати в реальній мережі.

У результаті виконання практикуму студент повинен уміти оцінювати затримку, втрати пакетів, пропускну здатність і мінливість параметрів; аналізувати структуру мережевого трафіку; пояснювати вплив перевантаження, черг і механізмів керування трафіком; формувати просту політику диференційованого обслуговування; діагностувати характерні порушення в Ethernet, Wi-Fi, PON і мобільних мережах; пов'язувати параметри QoS з якістю голосових, відео- та інтерактивних послуг; перевіряти виконання формалізованих вимог до якості за визначений період.

Методичні вказівки орієнтовані на розвиток практичного інженерного мислення та підготовку студентів до роботи з реальними телекомунікаційними системами, у яких якість послуги визначається не окремим показником, а сукупністю параметрів мережі, умов експлуатації та вимог конкретного застосування.

Практична робота 1

Аналіз частотних параметрів сигналів у телекомунікаційних системах

Мета роботи: формування у студентів практичних навичок визначення та аналізу частотних параметрів сигналів за результатами вимірювань, зокрема оцінювання частотної похибки, фазового шуму, ширини спектра та частотної стабільності сигналу, а також формування інженерного висновку щодо якості генерації та передавання сигналу.

Теоретичні відомості

Частотні параметри сигналів є критично важливими для забезпечення коректної роботи телекомунікаційних систем, оскільки вони визначають точність, стабільність і спектральну чистоту сигналу. Однією з основних характеристик є частотна похибка, яка визначає відхилення реальної частоти сигналу від номінального значення:

$$\Delta f = f_{meas} - f_{nom}. \quad (1.1)$$

Для зручності оцінювання часто використовують відносну похибку:

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f_{nom}}, \quad (1.2)$$

яка може виражатися у частках одиниці або в частинах на мільйон (ppm). Невелика частотна похибка є необхідною умовою для узгодженої роботи передавача і приймача.

Фазовий шум характеризує випадкові флуктуації фази сигналу, які проявляються у вигляді розширення спектра навколо несучої частоти. Він визначається як спектральна щільність потужності шуму у смузі частот відносно несучої:

$$L(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{noise}(f)}{P_{carrier}} \right), \quad (1.3)$$

де $P_{noise}(f)$ – потужність шуму в смузі на відхиленні f від несучої, а $P_{carrier}$ – потужність основного сигналу. Фазовий шум вимірюється у дБ/Гц і суттєво впливає на якість модуляції та здатність системи передавати інформацію без помилок.

Ширина спектра сигналу характеризує діапазон частот, у якому зосереджена основна частина його енергії. Для практичних вимірювань часто використовується

зайнята смуга (occupied bandwidth), яка визначається як інтервал частот, у якому міститься заданий відсоток потужності сигналу, наприклад 99%:

$$B_{occ} = f_{high} - f_{low}. \quad (1.4)$$

Цей параметр є важливим для оцінювання ефективності використання частотного ресурсу та відповідності стандартам.

Частотний дрейф описує зміну частоти сигналу у часі під впливом температури, нестабільності генератора або інших факторів. Він визначається як зміна частоти за певний інтервал часу:

$$D = \frac{\Delta f}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Наявність значного дрейфу призводить до розузгодження системи та погіршення якості зв'язку.

Таким чином, частотна похибка характеризує точність сигналу, фазовий шум – його спектральну чистоту, ширина спектра – ефективність використання частотного ресурсу, а частотний дрейф – стабільність у часі. Комплексний аналіз цих параметрів дозволяє оцінити якість генерації сигналу та його придатність до використання у телекомунікаційних системах.

Вимірювання частотних параметрів здійснюється за допомогою спектроаналізаторів, частотомірів та аналізаторів фазового шуму. Частотоміри забезпечують високу точність визначення частоти та її похибки, тоді як спектроаналізatori дозволяють оцінити ширину спектра та рівень шумових складових. Для вимірювання фазового шуму використовуються спеціалізовані аналізатори або методи порівняння сигналів із еталонними генераторами. Оцінювання частотного дрейфу виконується шляхом довготривалого спостереження за зміною частоти, що вимагає стабільних умов вимірювання та високоточних еталонів часу і частоти.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз точності та стабільності генератора сигналу.

Генератор у телекомунікаційній системі має номінальну частоту $f_{nom} = 2.4$ ГГц. За результатами вимірювання спектроаналізатором встановлено, що фактична частота сигналу становить $f_{meas} = 2.4000024$ ГГц.

На відхиленні від несучої 10 кГц рівень фазового шуму становить -90 дБ/Гц, а на відхиленні 100 кГц дорівнює -115 дБ/Гц.

За спектральним аналізом визначено, що 99% потужності сигналу зосереджено в межах частот від 2.39998 ГГц до 2.40002 ГГц.

Додатково встановлено, що протягом 10 хвилин частота сигналу змінилася до $f = 2.4000040$ ГГц.

Необхідно визначити абсолютну та відносну частотну похибку, оцінити її у ppm, обчислити зайняту смугу сигналу, визначити частотний дрейф генератора, а також проаналізувати зміну фазового шуму при збільшенні відхилення від несучої. На основі отриманих результатів потрібно зробити висновок щодо придатності генератора для використання у високошвидкісних телекомунікаційних системах.

Задача 2. Порівняльний аналіз двох передавачів за частотними параметрами

Розглядаються два передавачі, що працюють на частоті $f_{nom} = 900$ МГц.

Для першого передавача виміряно: $f_{meas1} = 900.0009$ МГц, рівень фазового шуму на 10 кГц – -85 дБ/Гц, на 100 кГц – -105 дБ/Гц. Зайнята смуга сигналу становить 250 кГц. За 5 хвилин частота змінилася на 600 Гц.

Для другого передавача: $f_{meas2} = 899.9997$ МГц, рівень фазового шуму на 10 кГц – -95 дБ/Гц, на 100 кГц – -120 дБ/Гц. Зайнята смуга становить 180 кГц. За той самий час частота змінилася на 1200 Гц.

Необхідно для кожного передавача визначити абсолютну та відносну частотну похибку, оцінити стабільність частоти через дрейф, порівняти спектральну ефективність за шириною зайнятої смуги та проаналізувати вплив фазового шуму на якість сигналу. Потрібно зробити інженерний висновок щодо того, який передавач є більш придатним для використання у сучасних телекомунікаційних системах, і пояснити компроміс між точністю частоти, стабільністю та спектральною чистотою сигналу.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Практична робота 2

Аналіз фазових параметрів сигналів у телекомунікаційних системах

Мета роботи: формування у студентів практичних навичок аналізу фазових параметрів сигналів за результатами вимірювань, визначення фазової помилки, фазового шуму та джитера, оцінювання групової та диференціальної затримки, а також формування інженерного висновку щодо якості передачі сигналу.

Теоретичні відомості

Фазові параметри сигналів є критично важливими для сучасних телекомунікаційних систем, особливо у випадку використання складних видів модуляції, де інформація кодується у фазі сигналу. Фазова помилка визначає відхилення фактичної фази сигналу від ідеального значення:

$$\Delta\varphi = \varphi_{meas} - \varphi_{ref}. \quad (2.1)$$

Цей параметр характеризує точність відтворення сигналу і безпосередньо впливає на ймовірність помилок при демодуляції.

Фазовий шум описує випадкові флуктуації фази сигналу у часі, які проявляються у вигляді розширення спектра навколо несучої частоти. Він визначається як відношення потужності шуму до потужності несучої на певному відхиленні від частоти:

$$L(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{noise}(f)}{P_{carrier}} \right). \quad (2.2)$$

Фазовий шум призводить до зниження точності синхронізації та погіршення якості модуляції.

Тісно пов'язаним параметром є джиттер, який характеризує часові флуктуації сигналу і визначається як відхилення моментів переходу сигналу від ідеального положення:

$$J = t_{actual} - t_{ideal}. \quad (2.3)$$

Джиттер може бути виражений у секундах або як стандартне відхилення часових коливань. Він безпосередньо пов'язаний із фазовим шумом, оскільки часові флуктуації є наслідком фазових нестабільностей.

Групова затримка визначає час проходження сигналу через систему та залежить від частоти:

$$\tau_g = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \quad (2.4)$$

де $\varphi(\omega)$ – фазова характеристика системи. Нерівномірність групової затримки призводить до спотворення форми сигналу, особливо у широкосмугових системах.

Диференціальна затримка характеризує різницю часу проходження різних компонент сигналу. Вона може бути визначена як різниця групових затримок на різних частотах:

$$\Delta\tau = \tau_{max} - \tau_{min}. \quad (2.5)$$

Цей параметр є критичним у багатоканальних системах і системах із широкою смугою частот, оскільки призводить до міжсимвольних спотворень.

Таким чином, фазова помилка визначає точність сигналу, фазовий шум і джиттер характеризують його нестабільність, а групова та диференціальна затримки описують спотворення сигналу при проходженні через канал. Комплексний аналіз цих параметрів дозволяє оцінити якість передачі інформації та стійкість системи до завад.

Вимірювання фазових параметрів здійснюється за допомогою осцилографів високої роздільної здатності, векторних аналізаторів сигналів та спектроаналізаторів із функцією вимірювання фазового шуму. Джиттер визначається шляхом аналізу часових інтервалів сигналу, тоді як групова затримка вимірюється за допомогою векторних аналізаторів кіл через фазово-частотну характеристику. Для точного аналізу фазових параметрів необхідні стабільні еталонні генератори та синхронізовані вимірювальні системи, що забезпечують високу точність і повторюваність результатів.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз фазових спотворень і часової нестабільності сигналу

У цифровому каналі передачі сигналу на частоті $f_0 = 100$ МГц за результатами вимірювань отримано такі дані.

Фактична фаза сигналу в момент вимірювання становить $\varphi_{meas}=48^\circ$ тоді як еталонне значення $\varphi_{ref}=45^\circ$.

Фазовий шум на відхиленні 1 кГц від несучої становить -80 дБ/Гц, а на відхиленні 10 кГц – -100 дБ/Гц.

За результатами осцилографічного аналізу встановлено, що середнє відхилення фронтів сигналу становить $J = 2$ нс.

Фазова характеристика каналу описується залежністю: $\varphi(\omega) = -2 \cdot 10^{-7} \omega$.

Необхідно: визначити фазову помилку сигналу, оцінити зміну фазового шуму при збільшенні відхилення від несучої та пояснити її фізичний зміст, обчислити групову затримку сигналу, проаналізувати вплив джитера на точність передачі, а також зробити висновок щодо якості каналу та можливості використання його для високошвидкісної передачі даних.

Задача 2. Порівняльний аналіз двох каналів за фазовими параметрами

Розглядаються два канали передачі сигналу.

Для першого каналу виміряно: фазова помилка $\Delta\varphi_1 = 2^\circ$, фазовий шум на 1 кГц – –85 дБ/Гц, джиттер $J_1 = 1$ нс. Груповая затримка на нижній частоті становить $\tau_{min1} = 50$ нс, а на верхній $\tau_{max1} = 65$ нс.

Для другого каналу: фазова помилка $\Delta\varphi_2 = 1^\circ$, фазовий шум на 1 кГц – –95 дБ/Гц, джиттер $J_2 = 3$ нс. Груповая затримка змінюється від 40 нс до 90 нс.

Необхідно: визначити диференціальну затримку для кожного каналу, порівняти вплив фазового шуму та джитера на якість сигналу, оцінити, який канал має кращу фазову стабільність, а також пояснити, чому канал із меншою фазовою помилкою може мати гірші характеристики передачі. На основі аналізу потрібно зробити інженерний висновок щодо вибору каналу для системи цифрового зв'язку з високими вимогами до якості.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Практична робота 3

Аналіз параметрів узгодження, згасання та якості сигналу в телекомунікаційних каналах

Мета роботи: формування у студентів знань і практичних навичок щодо оцінювання параметрів телекомунікаційних каналів

Теоретичні відомості

1. Узгодження в телекомунікаційних каналах

Узгодженням називається стан, за якого опір навантаження Z_L дорівнює хвильовому опору лінії передачі Z_0 . За цієї умови відбиття сигналу відсутнє, а передача енергії є максимально ефективною.

У сучасних телекомунікаційних системах використовуються такі типові значення хвильового опору:

- 50 Ом – у радіочастотних (RF) та мікрохвильових трактах;
- 75 Ом – у телевізійних та деяких цифрових системах;
- 100 Ом (диференційний режим) – у високошвидкісних цифрових інтерфейсах (Ethernet, USB, HDMI).

При невідповідності ($Z_L \neq Z_0$) виникають відбиття сигналу, що призводить до втрат енергії та спотворення переданого сигналу.

2. Коефіцієнт відбиття

Коефіцієнт відбиття характеризує частку сигналу, що відбивається від навантаження:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (3.1)$$

де Z_L – опір навантаження, Ом; Z_0 – хвильовий опір лінії, Ом.

Модуль коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$ набуває значень від 0 до 1. Значення $|\Gamma| = 0$ відповідає ідеальному узгодженню.

3. Коефіцієнт стоячої хвилі

Коефіцієнт стоячої хвилі (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) визначає ступінь узгодження:

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.2)$$

Значення $VSWR = 1$ відповідає ідеальному узгодженню. У практиці телекомунікацій прийнятними вважаються значення $VSWR \leq 2$.

4. Втрати на відбиття (Return Loss)

Втрати на відбиття характеризують ефективність узгодження в децибелах:

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma|. \quad (3.3)$$

Великі значення Return Loss свідчать про хороше узгодження. У сучасних системах:

- $RL > 20$ дБ – добре узгодження;
- $RL = 10\text{--}20$ дБ – задовільне;
- $RL < 10$ дБ – незадовільне.

5. Передача сигналу та згасання

Передача сигналу через канал описується коефіцієнтом передачі:

$$K = \frac{U_{out}}{U_{in}}, \quad (3.4)$$

де U_{out} – вхідна напруга; U_{in} – вихідна напруга.

Згасання сигналу визначається у децибелах:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{out}}{U_{in}} \right). \quad (3.5)$$

У сучасних вимірюваннях ці параметри відповідають S-параметру S_{21} , який характеризує передачу сигналу через тракт.

6. Відношення сигнал/шум (SNR)

Відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) визначає якість передачі:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}. \quad (3.6)$$

У децибелах:

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right). \quad (3.7)$$

Орієнтовна оцінка:

- понад 30 дБ – висока якість передачі;

- 20–30 дБ – задовільна;
- менше 20 дБ – низька якість.

7. Групова затримка сигналу

Групова затримка визначає швидкість проходження сигналу через канал і залежить від фазової характеристики:

$$\tau_g = -\frac{d\varphi}{d\omega}, \quad (3.8)$$

де $d\varphi$ – фаза сигналу; $d\omega$ – кутова частота.

Нерівномірність групової затримки призводить до фазових спотворень, що особливо критично для цифрових і широкосмугових систем передачі.

8. Сучасні параметри діагностики каналів

У сучасних телекомунікаційних системах широко використовуються такі параметри:

- S_{11} – коефіцієнт відбиття (узгодження);
- S_{21} – коефіцієнт передачі (втрати сигналу);
- BER (Bit Error Rate) – ймовірність бітової помилки;
- EVM (Error Vector Magnitude) – якість модуляції.

Ці параметри вимірюються за допомогою векторних аналізаторів кіл, спектроаналізаторів та цифрових вимірювальних систем.

Аналіз параметрів узгодження, згасання та якості сигналу є основою діагностики телекомунікаційних каналів. У сучасних системах ці характеристики визначають ефективність передачі, рівень втрат та достовірність приймання інформації. Поєднання класичних підходів (згасання, фазові характеристики) із сучасними методами (S-параметри, SNR, BER) дозволяє комплексно оцінювати стан каналів зв'язку.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз узгодження та відбиття сигналу

До радіочастотної лінії передачі з хвильовим опором ($Z_0 = 50$) Ом підключено навантаження ($Z_L = 75$) Ом.

Необхідно:

1. Визначити коефіцієнт відбиття Γ .
2. Обчислити коефіцієнт стоячої хвилі (VSWR).
3. Визначити втрати на відбиття (RL), дБ.
4. Оцінити якість узгодження та зробити висновок щодо ефективності передачі сигналу.

Задача 2. Аналіз передачі сигналу та згасання в каналі

На вхід телекомунікаційного каналу подається гармонічний сигнал напругою $U_{in} = 1$ В. На виході каналу виміряно напругу $U_{out} = 0,25$ В. Додатково відомо, що потужність шуму на виході каналу становить $P_{noise} = 0,5$ мВт, а потужність корисного сигналу $P_{signal} = 5$ мВт.

Необхідно:

1. Визначити коефіцієнт передачі сигналу K .
2. Обчислити згасання сигналу в каналі, дБ.
3. Визначити відношення сигнал/шум (SNR) у разях.
4. Обчислити SNR у децибелах.
5. Оцінити якість передачі сигналу та придатність каналу для передачі інформації.

Задача 3. Аналіз параметрів телекомунікаційного тракту

Для телекомунікаційного тракту отримано результати вимірювань: коефіцієнт відбиття на вході: $S_{11} = -12$ дБ; коефіцієнт передачі: $S_{21} = -4$ дБ; фазова характеристика сигналу описується залежністю $\varphi(f) = -2\pi f \cdot 3 \cdot 10^{-6}$.

Необхідно:

1. Визначити модуль коефіцієнта відбиття $| \Gamma |$.
2. Обчислити коефіцієнт стоячої хвилі (VSWR).
3. Оцінити рівень узгодження тракту.
4. Визначити коефіцієнт передачі сигналу у відносних одиницях.
5. Обчислити групову затримку сигналу (τ_g).
6. Проаналізувати, чи може даний тракт використовуватися для передачі високошвидкісних цифрових сигналів.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Практична робота 4

Аналіз завад та перешкодозахищеності телекомунікаційних каналів

Мета роботи: формування у студентів знань і практичних навичок щодо аналізу впливу завад на передавання сигналів у телекомунікаційних каналах

Теоретичні відомості

1. Загальні відомості про завади в телекомунікаційних каналах

У процесі передавання сигналів у телекомунікаційних системах на сигнал діють різноманітні завади, що призводять до спотворення інформації та зниження якості зв'язку.

Залежно від природи виникнення розрізняють:

- адитивні завади – існують незалежно від сигналу та додаються до нього;
- мультиплікативні завади – виникають лише за наявності сигналу та пов'язані зі зміною його параметрів.

До адитивних завад належать:

- тепловий шум (власні шуми елементів);
- атмосферні та індустриальні завади;
- шуми підсилювачів і ліній передачі.

До мультиплікативних завад належать:

- нелінійні спотворення;
- інтермодуляційні складові;
- паразитна модуляція.

2. Вплив завад на якість передачі сигналу

Завади впливають на рівень сигналу; спектральний склад; форму сигналу.

Особливо небезпечними є завади, спектр яких перекривається зі спектром корисного сигналу, оскільки вони безпосередньо погіршують розбірливість та достовірність переданої інформації.

У цифрових системах це призводить до зростання кількості помилок; зниження швидкості передачі; втрати синхронізації.

3. Відношення сигнал/шум (SNR)

Основним параметром, що характеризує завадостійкість каналу, є відношення сигнал/шум:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}. \quad (4.1)$$

У децибелах:

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right). \quad (4.2)$$

У сучасних телекомунікаційних системах, особливо бездротових, враховується не лише шум, а й взаємні завади:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise} + P_{interf}}. \quad (4.3)$$

Цей параметр є ключовим для мобільних мереж (LTE, 5G); систем з багатьма користувачами; радіомереж із щільним спектральним використанням.

4. Нелінійні спотворення та паразитна модуляція

Нелінійні елементи телекомунікаційних систем (підсилювачі, перетворювачі частоти) викликають гармоніки; інтермодуляційні продукти; паразитну модуляцію.

Рівень паразитних складових оцінюється за формулою:

$$a = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{signal}}{U_{distortion}} \right), \quad (4.4)$$

де U_{signal} – напруга основного сигналу; $U_{distortion}$ – напруга завади.

5. Моделювання завад за допомогою білого шуму

Для дослідження роботи каналів використовується білий шум, який має рівномірний спектр у заданій смузі частот; нормальний (гаусівський) розподіл. Білий шум застосовується для моделювання навантаження каналів; оцінювання впливу завад; тестування систем передачі.

У сучасних системах, крім білого шуму, використовують тестові цифрові сигнали; OFDM-сигнали; псевдовипадкові послідовності (PRBS).

6. Сучасні параметри якості телекомунікаційних систем

Для оцінювання якості передачі сигналів у сучасних системах використовуються:

- BER (Bit Error Rate) – ймовірність бітової помилки:

$$BER = \frac{N_{errors}}{N_{bits}}, \quad (4.5)$$

- EVM (Error Vector Magnitude) – міра відхилення сигналу від ідеального;
- Пропускна здатність каналу (за Шенноном):

$$C = B \log_2(1 + SNR), \quad (4.6)$$

де B – смуга частот каналу.

8. Методи вимірювання завад у сучасних системах

Завадостійкість є ключовою характеристикою телекомунікаційних каналів. Вона визначає здатність системи забезпечувати достовірну передачу інформації в умовах дії шумів і завад. У сучасних системах оцінювання завадостійкості базується на використанні таких параметрів, як SNR, SINR, BER та EVM. Поєднання класичних методів аналізу завад із сучасними цифровими підходами дозволяє комплексно оцінювати ефективність функціонування телекомунікаційних систем.

Сучасні вимірювання виконуються за допомогою спектроаналізаторів; векторних аналізаторів сигналів (VSA); програмно-визначуваних радіосистем (SDR); цифрових осцилографів. Ці засоби дозволяють аналізувати спектр сигналів; визначати рівень шуму; оцінювати якість модуляції; вимірювати параметри SNR, BER, EVM.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Оцінювання перешкодозахищеності каналу (SNR та SINR)

У телекомунікаційному каналі виміряно такі параметри: потужність корисного сигналу $P_{\text{signal}} = 8$ мВт; потужність шуму $P_{\text{noise}} = 0,2$ мВт; потужність завад від сусіднього каналу $P_{\text{interference}} = 0,8$ мВт.

Необхідно:

1. Визначити відношення сигнал/шум (SNR) у лінійних одиницях.
2. Обчислити SNR у децибелах.
3. Визначити відношення сигнал/(завади+шум) (SINR) у лінійних одиницях.
4. Обчислити SINR у децибелах.
5. Оцінити перешкодозахищеність каналу та зробити висновок щодо якості передачі.

Задача 2. Аналіз впливу нелінійних спотворень

На виході каналу виміряно: напруга основного сигналу $U_{\text{signal}} = 200$ мВ; напруга паразитної складової (інтермодуляційної) $U_{\text{distortion}} = 10$ мВ. Додатково відомо, що потужність шуму на виході каналу становить $P_{\text{noise}} = 0,05$ мВт, а потужність сигналу $P_{\text{signal}} = 2$ мВт.

Необхідно:

1. Визначити рівень нелінійних спотворень у децибелах.
2. Обчислити SNR у децибелах.
3. Порівняти вплив шуму та нелінійних спотворень.

4. Зробити висновок, який фактор більше погіршує перешкодозахищеність каналу.

Задача 3. Комплексна оцінка каналу передачі

Для цифрового каналу зв'язку задано: смуга частот каналу $B = 200$ кГц; потужність сигналу $P_{signal} = 1$ мВт; потужність шуму $P_{noise} = 0,01$ мВт; виміряне значення $BER = 10^{-4}$.

Необхідно:

1. Визначити SNR у лінійних одиницях.
2. Обчислити SNR у децибелах.
3. Визначити пропускну здатність каналу за формулою Шеннона.
4. Оцінити якість каналу за значенням BER. Зробити висновок щодо придатності каналу для передачі голосу; передавання даних; передавання відео.

Аналіз спектральних параметрів сигналів у телекомунікаційних системах

Мета роботи: формування у студентів практичних навичок аналізу спектральних характеристик сигналів за результатами вимірювань, визначення ширини смуги, центральної частоти, рівня шуму, коефіцієнта гармонічних та міжмодуляційних спотворень, а також оцінювання якості сигналу за відношенням сигнал/шум і прийняття інженерного рішення щодо його придатності до передавання інформації.

Теоретичні відомості

Спектральний аналіз сигналів дозволяє дослідити їх частотний склад і є одним із ключових методів оцінювання якості телекомунікаційних систем. Основним параметром є частота сигналу, яка визначає положення спектральної лінії. Для сигналів, що мають розподілений спектр, вводиться поняття центральної частоти, яка визначається як середнє значення спектра або частота максимальної амплітуди. У практиці вимірювань центральна частота визначається як частота основної складової сигналу.

Ширина смуги сигналу характеризує діапазон частот, у межах якого зосереджена основна частина енергії. Найчастіше використовується визначення за рівнем -3 дБ відносно максимуму спектра, при якому:

$$B = f_2 - f_1, \quad (5.1)$$

де f_2 і f_1 – частоти, на яких рівень сигналу зменшується на 3 дБ від максимуму. У цифрових системах ширина смуги також може визначатися за рівнем енергії або спектральної щільності.

Спектральна щільність потужності характеризує розподіл потужності сигналу по частоті і визначається як:

$$S(f) = P/B, \quad (5.2)$$

де P – потужність сигналу, а B – ширина смуги. У логарифмічній формі спектральна щільність часто задається в дБм/Гц, що дозволяє аналізувати слабкі сигнали на фоні шуму.

У реальних системах сигнал містить не лише основну частоту, але й гармоніки, що виникають через нелінійність елементів. Гармоніки мають частоти, кратні основній:

$$f_n = n \cdot f_0, \quad (5.3)$$

де n – номер гармоніки. Наявність гармонік призводить до спотворення сигналу і зниження якості передачі.

Кількісною характеристикою гармонічних спотворень є коефіцієнт гармонічних спотворень:

$$THD = \frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}, \quad (5.4)$$

де U_1 – амплітуда основної гармоніки, а $U_2, U_3, \dots$ – амплітуди вищих гармонік. У децибелах цей параметр може бути записаний як:

$$THD_{dB} = 20 \log_{10}(THD). \quad (5.5)$$

У випадку одночасного передавання кількох сигналів виникають міжмодуляційні спотворення, які проявляються у вигляді додаткових спектральних складових. Їх частоти визначаються як комбінації основних частот:

$$f_{im} = |m f_1 \pm n f_2|, \quad (5.6)$$

де m і n – цілі числа. Ці складові можуть потрапляти в робочу смугу і суттєво погіршувати якість сигналу.

Шум у спектрі характеризується рівнем потужності, розподіленим у смузі частот. Рівень шуму в заданій смузі визначається інтегруванням спектральної щільності:

$$P_{noise} = \int_f S(f) df. \quad (5.7)$$

У практичних вимірюваннях цей параметр визначається як середній рівень шуму в смузі аналізу SNR.

Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки сигнал перевищує шумовий фон і є критичним для визначення якості передачі.

Таким чином, аналіз спектральних характеристик дозволяє комплексно оцінити якість сигналу. Визначення ширини смуги, центральної частоти, рівня шуму, гармонічних і міжмодуляційних складових дає можливість оцінити ступінь

спотворення сигналу та ефективність використання частотного ресурсу. У сучасних телекомунікаційних системах ці параметри безпосередньо впливають на швидкість передачі даних, завадостійкість та відповідність стандартам.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз спектра сигналу з гармонічними спотвореннями

За результатами вимірювання спектроаналізатором отримано такі дані: основна гармоніка сигналу має частоту $f_0 = 1$ МГц і рівень -10 дБм. Друга гармоніка на частоті 2 МГц має рівень -30 дБм, третя гармоніка на частоті 3 МГц – -35 дБм. Рівень шуму в смузі аналізу становить -80 дБм, а межі смуги сигналу за рівнем -3 дБ визначено як $f_1 = 0.98$ МГц і $f_2 = 1.02$ МГц.

Необхідно визначити ширину смуги сигналу, спектральну щільність потужності, коефіцієнт гармонічних спотворень у лінійній формі та в децибелах, а також відношення сигнал/шум. На основі отриманих результатів слід оцінити ступінь спотворення сигналу та зробити висновок щодо його придатності для використання у телекомунікаційній системі.

Задача 2. Аналіз спектра з міжмодуляційними спотвореннями та оцінка якості каналу

У радіоканалі одночасно передаються два сигнали з частотами $f_1 = 900$ МГц і $f_2 = 901$ МГц, рівні яких становлять відповідно -20 дБм і -22 дБм. У спектрі виявлено міжмодуляційні складові третього порядку на частотах $2f_1 - f_2$ і $2f_2 - f_1$ з рівнями -50 дБм. Рівень шуму в смузі становить -90 дБм. Ширина смуги кожного сигналу дорівнює 200 кГц.

Необхідно визначити частоти міжмодуляційних продуктів, оцінити рівень міжмодуляційних спотворень відносно основних сигналів, обчислити відношення сигнал/шум, а також проаналізувати, чи можуть міжмодуляційні складові впливати на сусідні канали. Потрібно зробити інженерний висновок щодо якості спектра та можливості коректної роботи системи в умовах багатосигнального режиму.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Практична робота 6

Визначення коефіцієнта помилок і статистичне оцінювання перешкодозахищеності цифрового каналу

Мета роботи: засвоєння студентами методики визначення коефіцієнта помилок у цифровому каналі зв'язку, набуття навичок розрахунку статистичних характеристик результатів вимірювання, оцінювання відносної похибки та довірчих меж коефіцієнта помилок, а також формування вміння робити висновок щодо перешкодозахищеності каналу на основі експериментальних або заданих даних.

Теоретичні відомості

Коефіцієнт помилок є однією з основних характеристик лінійного тракту та цифрового каналу передавання. Він показує, яка частка переданих символів або бітів була прийнята помилково протягом заданого інтервалу спостереження, і тому безпосередньо характеризує перешкодозахищеність та якість передавання інформації. У сучасних телекомунікаційних системах для цього параметра найчастіше використовують терміни коефіцієнт помилок, ймовірність помилки, BER (Bit Error Rate) для бітів або SER (Symbol Error Rate) для символів. У навчальній практиці доцільно розглядати коефіцієнт помилок як статистичну оцінку якості каналу, що визначається за результатами спостереження над реально переданою послідовністю.

Коефіцієнт помилок $k_{ном}$ визначають як відношення кількості помилково прийнятих символів до загальної кількості переданих символів за інтервал вимірювання:

$$k_{ном} = N_{ном} / N, \quad (6.1)$$

де N – загальне число символів, переданих за час вимірювання, а $N_{ном}$ – число символів, прийнятих з помилкою за той самий інтервал.

Для двійкових систем за аналогією часто записують:

$$BER = \frac{N_{errors}}{N_{bits}}, \quad (6.2)$$

де N_{bits} – число переданих бітів, а N_{errors} – число помилково прийнятих бітів.

Важливо враховувати, що вимірювання коефіцієнта помилок має статистичний характер. Отримане значення $k_{ном}$ не є абсолютно точним, а є оцінкою істинного коефіцієнта помилок у каналі. Точність цієї оцінки залежить від обсягу статистики,

тобто від кількості переданих символів N , а також від числа зафіксованих помилок. Чим довше триває вимірювання і чим більший масив даних оброблено, тим надійнішим є результат. Саме тому в системах цифрового зв'язку для оцінювання BER часто задають не лише саме значення коефіцієнта помилок, а й довірчу ймовірність та довірчий інтервал.

Якщо число помилок достатньо велике, то для оцінювання відносної похибки можна використовувати наближення, основане на нормальному законі розподілу. Відносна похибка вимірювання визначається виразом:

$$\eta = \frac{t_\beta}{\sqrt{N_{\text{пом}}}}, \quad (6.3)$$

де t_β – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності результату вимірювання. Із цієї формули видно, що похибка зменшується зі зростанням числа виявлених помилок. Отже, для точного визначення коефіцієнта помилок потрібно або збільшувати тривалість спостереження, або проводити вимірювання за умов, коли число помилок не є надто малим.

Коефіцієнт t_β пов'язаний з довірчою ймовірністю β через обернену функцію інтеграла ймовірності:

$$t_\beta = \Phi^* \left(\frac{1+\beta}{2} \right), \quad (6.4)$$

де Φ^* – обернена функція до інтеграла ймовірності. Сам інтеграл ймовірності визначається співвідношенням:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt. \quad (6.5)$$

На практиці значення t_β зазвичай беруть із таблиць нормального розподілу. Наприклад, для довірчої ймовірності $\beta = 0,95$ використовують значення $t_\beta \approx 1,96$, а для $\beta = 0,99$ – $t_\beta \approx 2,58$. Це дозволяє оцінити, з якою надійністю визначений коефіцієнт помилок.

Оскільки коефіцієнт помилок є статистичною оцінкою, доцільно визначати не лише його саме значення, а й межі, в яких із заданою довірчою ймовірністю знаходиться істинне значення. Верхня та нижня довірчі межі для коефіцієнта помилок при нормальному наближенні обчислюються за формулами:

$$p_v = k_{\text{пом}} + t_\beta \sqrt{\frac{k_{\text{пом}}(1-k_{\text{пом}})}{N}}, p_n = k_{\text{пом}} - t_\beta \sqrt{\frac{k_{\text{пом}}(1-k_{\text{пом}})}{N}}, \quad (6.6)$$

Ці вирази дають можливість оцінити інтервал невизначеності результату. Якщо інтервал широкий, це означає, що даних для точного висновку ще недостатньо. Якщо ж інтервал вузький, оцінка коефіцієнта помилок є більш надійною. У методичному плані це дуже важливо, оскільки студенти повинні розуміти: саме по собі значення BER ще не дає повної інформації без оцінювання достовірності результату.

Точність оцінювання коефіцієнта помилок істотно залежить від загального числа переданих символів. Якщо швидкість передавання становить (B) символів за секунду, а тривалість вимірювання дорівнює (T), то

$$N=BT. \quad (6.7)$$

Звідси випливає, що зі збільшенням швидкості передавання або часу спостереження зростає обсяг вибірки, а отже підвищується точність статистичної оцінки. Це положення є особливо важливим для сучасних цифрових телекомунікацій, де при високих швидкостях можна за короткий час передати дуже велику кількість бітів і отримати достатньо точну оцінку BER. Водночас у високоякісних каналах, де помилки виникають дуже рідко, для достовірного вимірювання можуть знадобитися значні часові інтервали спостереження.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Визначення коефіцієнта помилок і відносної похибки

У цифровому каналі за час вимірювання було передано $N = 2 \cdot 10^5$ символів. Кількість помилково прийнятих символів становила $N_{\text{пом}} = 50$. Довірча ймовірність результату вимірювання дорівнює $\beta = 0,95$, для якої прийняти $t_\beta = 1,96$.

Необхідно обчислити коефіцієнт помилок $k_{\text{пом}}$, визначити відносну похибку вимірювання η та зробити висновок про точність отриманої оцінки.

Задача 2. Визначення довірчих меж коефіцієнта помилок

Швидкість передавання в цифровому каналі становить $B = 64$ кбіт/с, а тривалість вимірювання $T = 20$ с. За цей час було зареєстровано $N_{\text{пом}} = 32$ помилки. Довірча ймовірність дорівнює $\beta = 0,99$, тоді $t_\beta \approx 2,58$.

Необхідно визначити загальну кількість переданих бітів N , обчислити коефіцієнт помилок $k_{\text{пом}}$, знайти верхню p_v і нижню p_n довірчі межі та оцінити, у яких межах з імовірністю 0,99 знаходиться істинне значення коефіцієнта помилок.

Задача 3. Аналіз впливу часу вимірювання на точність оцінки

У каналі передавання даних зі швидкістю $V = 2$ Мбіт/с було проведено два вимірювання коефіцієнта помилок. У першому випадку тривалість вимірювання становила $T_1 = 1$ с, при цьому зареєстровано $N_{ном1} = 24$ помилки. У другому випадку тривалість вимірювання становила $T_2 = 10$ с, при цьому зареєстровано $N_{ном2} = 210$ помилок. Для обох випадків прийняти довірчу ймовірність $\beta = 0,95$.

Необхідно для кожного випадку визначити число переданих бітів N , коефіцієнт помилок $k_{ном}$, знайти верхню p_v і нижню p_n довірчі межі. На основі результатів порівняти точність обох вимірювань і пояснити, як збільшення тривалості спостереження впливає на надійність статистичної оцінки коефіцієнта помилок.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Аналіз параметрів цифрових каналів за результатами вимірювань

Мета роботи: формування у студентів знань і практичних навичок щодо оцінювання якості цифрових каналів зв'язку за параметрами помилок.

Теоретичні відомості

У цифрових телекомунікаційних системах якість каналу оцінюється на основі статистики помилок, що виникають під час передавання інформації. Основним параметром є коефіцієнт бітових помилок, який визначається як відношення кількості помилково прийнятих бітів до загальної кількості переданих бітів:

$$BER = \frac{N_{err}}{N_b}, \quad (7.1)$$

де N_{err} – кількість помилкових бітів, а N_b – загальна кількість переданих бітів. Цей параметр характеризує середню ймовірність помилки в каналі та є базовою оцінкою його перешкодозахищеності.

У системах, де передавання відбувається не окремими бітами, а символами, використовується коефіцієнт символних помилок:

$$SER = \frac{N_{sym,err}}{N_{sym}}, \quad (7.2)$$

де $N_{sym,err}$ – кількість помилкових символів, а N_{sym} – загальна кількість переданих символів. Зв'язок між BER і SER залежить від типу модуляції та кількості бітів у символі.

При передаванні даних у вигляді пакетів або блоків важливими є параметри, що характеризують цілісність переданих структур. Коефіцієнт помилок пакетів визначається як:

$$PER = \frac{N_{pkterr}}{N_{pkt}}, \quad (7.3)$$

де N_{pkterr} – кількість пакетів, прийнятих з помилками, а N_{pkt} – загальна кількість переданих пакетів. Аналогічно визначається коефіцієнт блокових помилок:

$$BLER = \frac{N_{blk,err}}{N_{blk}}, \quad (7.4)$$

який використовується для оцінювання систем із кодуванням і передаванням блоків даних.

Часова структура помилок описується параметрами ES та SES. Секунда з помилками (ES) – це одnoseкундний інтервал, у якому зафіксовано хоча б одну помилку, тоді як секунда, уражена помилками (SES), відповідає інтервалу з високою концентрацією помилок, наприклад при $BER \geq 10^{-3}$. Частка таких інтервалів визначається як відношення їх кількості до загального часу спостереження.

Коефіцієнт втрати пакетів визначає частку пакетів, які не були доставлені до приймача:

$$PLR = \frac{N_{lost}}{N_{sent}}, \quad (7.5)$$

де N_{lost} – кількість втрачених пакетів, а N_{sent} – загальна кількість переданих пакетів. Цей параметр є критичним для мереж із пакетною передачею, таких як IP-мережі.

Ефективна швидкість передачі даних відрізняється від номінальної через наявність помилок і службової інформації. Вона визначається як:

$$R_{eff} = R \cdot (1 - BER), \quad (7.6)$$

де R – номінальна швидкість передавання. У більш загальному випадку ефективність передачі з урахуванням втрат пакетів визначається через коефіцієнт успішної доставки.

Надлишковість каналу пов'язана з використанням кодів корекції помилок і визначається як відношення службової інформації до загального обсягу переданих даних. Якщо корисна частина становить k біт із n , то надлишковість можна оцінити як:

$$r = \frac{n-k}{n}. \quad (7.7)$$

Затримка передачі пакета є важливим параметром, що визначає швидкодію системи та якість сервісу. Вона включає час передачі, обробки та поширення сигналу і визначається як:

$$\tau = t_{receive} - t_{send}. \quad (7.8)$$

Цей параметр є критичним для систем реального часу.

Усі наведені параметри взаємопов'язані. Збільшення BER призводить до зростання PER і BLER, що зменшує ефективну швидкість передачі. Наявність надлишковості зменшує кількість помилок, але одночасно знижує корисну пропускну здатність. Аналіз цих залежностей дозволяє оцінити не лише якість каналу, а й ефективність його використання.

Оцінювання параметрів якості цифрового каналу здійснюється за допомогою генераторів тестових послідовностей і BER-тестерів, які формують відомий сигнал (зазвичай PRBS) і порівнюють прийняту послідовність з еталонною. Схема вимірювання включає передавач тестового сигналу, досліджуваний канал та приймальний блок із синхронізацією і детектором помилок. Для визначення BER, SER, PER і BLER використовується підрахунок помилок за заданий інтервал часу або обсяг даних. Часові параметри, зокрема затримка та джитер, вимірюються осцилографами або аналізаторами протоколів із часовою прив'язкою подій. У пакетних мережах додатково застосовуються аналізатори трафіку та мережеві тестери, які дозволяють оцінити втрати пакетів і затримки. Важливою особливістю є необхідність точної синхронізації переданих і прийнятих даних, оскільки навіть незначні розузгодження можуть суттєво вплинути на результати вимірювань.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз параметрів цифрового каналу

У цифровому каналі за час спостереження $T = 200$ с передано $N_b = 4 \cdot 10^6$ бітів, з яких $N_{err} = 3200$ прийнято з помилками. Передавання здійснюється пакетами по 1000 біт. Загальна кількість переданих пакетів становить $N_{pkt} = 4000$, з них $N_{pkt,err} = 180$ прийнято з помилками, а $N_{lost} = 60$ втрачено.

У системі використовується кодування, при якому з 1200 переданих біт 1000 є корисними. Середній час затримки передачі одного пакета становить $t_{send} = 2.5$ мс, а момент прийому $t_{receive} = 5.1$ мс.

Необхідно визначити коефіцієнт бітових помилок BER, коефіцієнт пакетних помилок PER, коефіцієнт втрати пакетів, ефективну швидкість передачі даних, надлишковість каналу та затримку передачі. На основі отриманих результатів слід оцінити якість каналу та його придатність для передавання даних.

Задача 2. Порівняльний аналіз двох цифрових каналів

Розглядаються два цифрові канали однакової номінальної швидкості $R = 10$ Мбіт/с.

Для першого каналу зафіксовано: $N_b = 10^7$, $N_{err1} = 5 \cdot 10^3$, $N_{pkt1} = 10^4$, $N_{pkt,err1} = 120$, $N_{lost1} = 20$.

Для другого каналу: $N_b = 10^7$, $N_{err1} = 2 \cdot 10^4$, $N_{pkt1} = 10^4$, $N_{pkt,err1} = 60$, $N_{lost1} = 150$.

В обох каналах використовується кодування зі співвідношенням $k/n = 0.8$. Затримка передачі пакета в першому каналі становить 3 мс, у другому – 6 мс.

Необхідно для кожного каналу визначити BER, PER, коефіцієнт втрати пакетів, ефективну швидкість передачі з урахуванням помилок і надлишковості, а також виконати порівняльний аналіз якості каналів. Потрібно пояснити, чому канал із меншим BER може виявитися гіршим у реальних умовах експлуатації, і зробити обґрунтований інженерний висновок щодо вибору кращого каналу.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Практична робота 8

Аналіз норм якості цифрових телекомунікаційних систем

Мета роботи: формування у студентів знань і практичних навичок щодо оцінювання якості цифрових каналів зв'язку за параметрами помилок.

Теоретичні відомості

Якість цифрових телекомунікаційних систем визначається насамперед рівнем помилок, які виникають у процесі передавання інформації. Бітові помилки є наслідком впливу шумів, завад, нелінійних спотворень та обмежень каналу і безпосередньо впливають на достовірність передавання даних, якість мовлення та ефективність використання пропускну здатності.

Основною кількісною характеристикою є коефіцієнт бітових помилок BER. Цей параметр є узагальненою оцінкою перешкодозахищеності каналу.

Згідно з рекомендаціями ITU-T, зокрема G.821, G.826 та серії M.2100, якість цифрових трактів класифікується за значенням BER. У практиці телекомунікацій прийнято вважати, що нормальний режим роботи відповідає значенням $BER < 10^{-6}$, знижена якість відповідає діапазону $10^{-6} < BER < 10^{-3}$, а при $BER \geq 10^{-3}$ канал вважається непридатним до експлуатації. Ці критерії залишаються актуальними і сьогодні, хоча в сучасних високошвидкісних системах, таких як оптичні мережі або 5G, вимоги можуть бути значно жорсткішими і досягати рівнів 10^{-9} – 10^{-12} після корекції помилок.

Оскільки виникнення помилок має випадковий характер, для оцінювання якості використовуються статистичні параметри, що враховують часову структуру помилок. До таких параметрів належить секунда з помилками (Error Second, ES), яка визначається як інтервал тривалістю одну секунду, що містить хоча б одну помилку. Більш критичним показником є секунда з великою кількістю помилок (Severely Errored Second, SES), для якої характерне значення $BER \geq 10^{-3}$ протягом однієї секунди. Використання цих параметрів дозволяє оцінити не лише середній рівень помилок, а й їх розподіл у часі, що є важливим для реальних систем зв'язку.

Оцінювання параметрів помилок здійснюється протягом так званого часу готовності каналу, який визначається як інтервал стабільної роботи системи без значних збоїв. Для стандартизації оцінювання використовується модель еталонного з'єднання (Hypothetical Reference Connection), довжина якого становить 27500 км. Норми якості розподіляються між окремими ділянками такого з'єднання пропорційно їх довжині. Для ділянки довжиною L км допустиме значення параметра якості визначається за співвідношенням:

$$A_L = 0.0016 \cdot L \text{ \% / км.} \quad (8.1)$$

У процесі експлуатації використовуються різні види норм якості. Експлуатаційна норма визначається як:

$$RPO = A \cdot T \cdot PO, \quad (8.2)$$

де PO – нормоване значення параметра якості, $T = 86400$ с – інтервал вимірювання (одна доба), A – коефіцієнт розподілу норми.

Для введення системи в експлуатацію застосовується більш жорстка настроювальна норма:

$$BISO = RPO / 2. \quad (8.3)$$

Для прийняття рішення про придатність каналу використовують граничні значення:

$$S_1 = RPO / 2 - D, \quad S_2 = RPO / 2 + D, \quad (8.4)$$

де D – дисперсія оцінюваного параметра.

Якщо результати вимірювання не перевищують S_1 , канал вважається придатним до експлуатації. Якщо значення перевищують S_2 , необхідно виконати коригувальні дії. У разі, коли результати знаходяться між S_1 і S_2 , канал може бути введений в експлуатацію умовно з подальшим контролем.

У сучасних телекомунікаційних системах аналіз параметрів помилок доповнюється оцінюванням впливу завад, типу модуляції та алгоритмів корекції помилок. Важливу роль відіграють методи прямого виправлення помилок (FEC), які дозволяють значно зменшити BER на приймальній стороні. У цьому випадку розрізняють показники до декодування (pre-FEC BER) і після декодування (post-FEC BER), що є важливим при оцінюванні ефективності системи.

Вимірювання коефіцієнта помилок здійснюється за допомогою спеціалізованих приладів – BER-тестерів, які формують псевдовипадкові послідовності (PRBS) і виконують порівняння переданого та прийнятого сигналів. У сучасних умовах також широко використовуються програмно-визначувані радіосистеми та цифрові аналізатори сигналів, що дозволяють виконувати гнучкий аналіз помилок у реальному часі.

Таким чином, параметри помилок є ключовим критерієм оцінювання якості цифрових каналів зв'язку. Їх аналіз дозволяє визначити перешкодозахищеність системи, оцінити її відповідність міжнародним стандартам та прийняти обґрунтоване рішення щодо введення в експлуатацію або необхідності оптимізації параметрів передачі.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Оцінювання якості цифрового тракту за BER, ES та SES

Під час добового контролю цифрового тракту зі швидкістю передавання $B = 2.048$ Мбіт/с було передано бітову послідовність протягом $T = 86400$ с. За результатами вимірювання зареєстровано $N_{err} = 1.2 \cdot 10^5$ помилкових бітів. Під час аналізу одnoseкундних інтервалів встановлено, що кількість секунд з помилками становить $ES = 420$, а кількість секунд, уражених помилками, становить $SES = 18$. Необхідно визначити загальну кількість переданих бітів за час спостереження, обчислити коефіцієнт бітових помилок (BER), порівняти отримане значення з межами нормального, пониженого та неприйнятного станів каналу, а також проаналізувати, чи узгоджується середнє значення BER з кількістю зареєстрованих секунд ES і SES. Потрібно дати інженерний висновок щодо загального стану тракту та пояснити, чи можна вважати канал придатним для передавання мовного трафіку, цифрових даних і сервісів, чутливих до помилок.

Задача 2. Розрахунок норми якості для ділянки тракту та прийняття рішення про введення в експлуатацію

Для цифрового тракту високої категорії якості довжиною $L = 1850$ км необхідно оцінити допустимі межі якості за параметром секунд з помилками. Для цієї ділянки прийнято $PO = 0.04$, $T = 86400$ с, а дисперсія оцінюваного параметра становить $D = 6$. У результаті добового вимірювання отримано $ES = 31$ подію.

Необхідно обчислити частку норми якості A_L для заданої довжини тракту, визначити значення RPO , $BISO$, а також порогові значення S_1 і S_2 . Після цього слід порівняти виміряне число подій ES з межами S_1 і S_2 та зробити аргументований висновок: тракт можна ввести в експлуатацію безумовно, умовно з подальшим контролем чи необхідно виконати коригувальні дії. Пояснити фізичний зміст використання двох меж S_1 і S_2 з точки зору інженерної практики.

Задача 3. Порівняльний інженерний аналіз двох цифрових трактів з урахуванням pre-FEC і post-FEC оцінки

Потрібно порівняти два цифрові тракти, що працюють в однаковій системі передавання. Для обох трактів добовий інтервал спостереження становить $T = 86400$ с. Для першого тракту зафіксовано $N_{err1} = 8.5 \cdot 10^4$ помилкових бітів при швидкості $B_1 = 34$ Мбіт/с, кількість секунд з помилками дорівнює $ES_1 = 260$, а секунд, уражених помилками, $SES_1 = 4$. Для другого тракту зафіксовано $N_{err2} = 2.7 \cdot 10^5$ помилкових бітів при швидкості $B_2 = 140$ Мбіт/с, кількість секунд з помилками дорівнює $ES_2 = 510$, а секунд, уражених помилками, $SES_2 = 21$. Додатково відомо, що після застосування корекції помилок для другого тракту оцінка post-FEC становить $BER_{post} = 10^{-10}$.

Необхідно для кожного тракту обчислити загальне число переданих бітів за добу та визначити значення (BER). Після цього слід порівняти обидва тракти за критеріями BER, ES та SES, а також пояснити, чому тракт із більшим числом абсолютних помилок не завжди є гіршим. Далі потрібно проаналізувати, як змінюється оцінка якості другого тракту при переході від pre-FEC до post-FEC аналізу, і зробити висновки щодо доцільності його використання в сучасних високошвидкісних системах. Наприкінці слід сформулювати інженерну рекомендацію: який із двох трактів є кращим без корекції помилок і який є кращим з урахуванням сучасних завадостійких методів оброблення.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Вимірювання та аналіз S-параметрів телекомунікаційних трактів

Мета роботи: формування у студентів знань і практичних навичок щодо аналізу високочастотних телекомунікаційних трактів за допомогою S-параметрів, зокрема визначення коефіцієнтів відбиття та передачі, оцінювання узгодження ліній передачі, розрахунку втрат сигналу, аналізу енергетичних характеристик тракту, а також інтерпретації результатів вимірювань для прийняття інженерних рішень щодо придатності системи до експлуатації.

Теоретичні відомості

У сучасних телекомунікаційних системах аналіз високочастотних трактів, ліній передачі, антен та активних компонентів виконується за допомогою параметрів розсіювання, або S-параметрів (scattering parameters). На відміну від класичних параметрів напруг і струмів, які важко вимірювати на високих частотах через вплив паразитних ефектів, S-параметри дозволяють описувати поведінку пристрою через хвильові величини, що є природними для ВЧ та НВЧ діапазонів.

Розглянемо багатопортову мережу, у якій кожному порту відповідають падаюча хвиля a_i та відбита хвиля b_i . S-параметри визначаються як відношення відбитих хвиль до падаючих за умов, що всі інші порти узгоджені з хвильовим опором Z_0 :

$$b_i = \sum_{j=1} S_{ij} a_j. \quad (9.1)$$

Для двопортової мережі це співвідношення набуває вигляду

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2, \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2. \end{cases} \quad (9.2)$$

Фізичний зміст параметрів полягає в тому, що S_{11} характеризує відбиття сигналу на вході, S_{22} – відбиття на виході, S_{21} – передачу сигналу від входу до виходу, а S_{12} – зворотну передачу. Величини a_i та b_i пов'язані з напругою і струмом у порту через нормування на хвильовий опір:

$$a_i = \frac{U_i + Z_0 I_i}{2\sqrt{Z_0}}, \quad b_i = \frac{U_i - Z_0 I_i}{2\sqrt{Z_0}}, \quad (9.3)$$

S-параметри безпосередньо пов'язані з коефіцієнтом відбиття. Для входу двопортової мережі при узгодженому навантаженні:

$$\Gamma_{in} = S_{11}. \quad (9.4)$$

У загальному випадку, коли навантаження не узгоджене, вхідний коефіцієнт відбиття визначається як

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1-S_{11}\Gamma_L}, \quad (9.5)$$

де Γ_L – коефіцієнт відбиття навантаження:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (9.6)$$

Аналогічно визначається вихідний коефіцієнт відбиття:

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1-S_{11}\Gamma_S}, \quad (9.7)$$

де Γ_S – коефіцієнт відбиття джерела.

Для оцінювання узгодження широко використовується коефіцієнт стоячої хвилі:

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}. \quad (9.8)$$

Втрати на відбиття (Return Loss) визначаються через коефіцієнт відбиття:

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma|. \quad (9.9)$$

Передавальні властивості двопортової мережі характеризуються параметром S_{21} , який визначає коефіцієнт передачі за напругою:

$$|S_{21}| = \frac{|b_2|}{|a_1|}. \quad (9.10)$$

У децибелах коефіцієнт передачі записується як:

$$G = 20 \log_{10} |S_{21}|. \quad (9.11)$$

Якщо розглядається потужність, тоді:

$$GP = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right). \quad (9.12)$$

Важливим параметром є коефіцієнт відбиття потужності, який пов'язаний із S-параметрами:

$$P_{refl} = |\Gamma|^2 P_{inc}. \quad (9.13)$$

У практиці аналізу підсилювачів широко використовують коефіцієнт підсилення за потужністю. Для узгоджених умов він визначається як:

$$G_T = \frac{P_L}{P_{av}}, \quad (9.14)$$

а в загальному випадку з урахуванням неузгодження:

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2) (1 - |\Gamma_L|^2)}{(1 - S_{11} \Gamma_S)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_S \Gamma_L^2}. \quad (9.15)$$

Для аналізу стійкості підсилювачів використовують критерій Роллета:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|}, \quad (9.16)$$

де

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}. \quad (9.17)$$

Система є безумовно стійкою, якщо виконується умова $K > 1$ та $|\Delta| < 1$.

Важливим є також коефіцієнт відбиття, виражений через імпеданс:

$$Z = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}. \quad (9.18)$$

Це співвідношення дозволяє переходити від вимірних S-параметрів до еквівалентного опору навантаження.

Вимірювання S-параметрів здійснюється за допомогою векторних аналізаторів кіл (VNA), які визначають амплітуду та фазу падаючих і відбитих хвиль. Для отримання точних результатів застосовується калібрування, найпоширенішими методами якого є SOLT (Short-Open-Load-Through) та TRL (Thru-Reflect-Line).

Калібрування дозволяє виключити вплив кабелів, перехідників і вимірювальної системи.

Таким чином, S-параметри є універсальним інструментом аналізу високочастотних телекомунікаційних систем. Вони дозволяють кількісно оцінювати узгодження, передачу, втрати, підсилення та стійкість пристроїв, а також виконувати повний інженерний аналіз трактів передачі сигналів. Наведені співвідношення є базою для розрахунків, які виконуються при вирішенні практичних задач, пов'язаних із вимірюванням і діагностикою телекомунікаційних систем.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз узгодження та втрат на відбиття

Для двопортового пристрою, вимірюного за допомогою векторного аналізатора кіл, отримано значення: $S_{11} = -12$ дБ, $S_{21} = -3$ дБ. Хвильовий опір системи $Z_0 = 50$ Ом.

Необхідно:

1. Визначити модуль коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$ на вході:
2. Обчислити коефіцієнт стоячої хвилі.
3. Визначити частку відбитої потужності P_{reflec} .
4. Обчислити коефіцієнт передачі за потужністю G .
5. Зробити висновок щодо узгодження тракту та ефективності передачі сигналу.

Задача 2. Розрахунок вхідного коефіцієнта відбиття при неузгодженому навантаженні

Для двопортового пристрою задано S-параметри у комплексній формі: $S_{11} = 0.2$, $S_{12} = 0.05$, $S_{21} = 2.5$, $S_{22} = 0.3$. Навантаження має опір $Z_L = 75$ Ом, хвильовий опір $Z_0 = 50$ Ом.

Необхідно:

1. Визначити коефіцієнт відбиття навантаження Γ_L .
2. Обчислити вхідний коефіцієнт відбиття Γ_{in} .
3. Визначити вхідний опір пристрою Z_{in} .
4. Оцінити ступінь узгодження на вході та зробити висновок щодо впливу неузгодженого навантаження на роботу тракту.

Задача 3. Аналіз підсилювача та перевірка його стійкості

Для підсилювача на заданій частоті вимірюно: $S_{11} = 0.4$, $S_{12} = 0.02$, $S_{21} = 3.0$, $S_{22} = 0.5$.

Необхідно:

1. Обчислити параметр Δ .

2. Визначити критерій Роллета K .
3. Перевірити умови стійкості $K > 1, /1/ < 1$.
4. Визначити коефіцієнт підсилення у децибелах G .

Зробити інженерний висновок щодо стійкості підсилювача і можливості його використання в телекомунікаційних системах.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Аналіз параметрів потужності радіоканалу за результатами вимірювань

Мета роботи: є набуття студентами практичних навичок розрахунку параметрів радіоканалу за результатами вимірювань, визначення потужності прийнятого сигналу, втрат у вільному просторі, рівня RSSI та SINR, а також оцінювання якості бездротового каналу та його придатності до передачі інформації.

Теоретичні відомості

Передавання сигналу в радіоканалі супроводжується його ослабленням у просторі, яке визначається геометрією поширення хвилі та властивостями середовища. Потужність сигналу, що досягає приймача, залежить від потужності передавача, характеристик антен і втрат у каналі. У найпростішому випадку для вільного простору використовується рівняння радіолінії, яке описує потужність прийнятого сигналу:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (10.1)$$

де P_t – потужність передавача, G_t і G_r – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен відповідно, G_r – довжина хвилі, а R – відстань між антенами. Це співвідношення показує, що потужність сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані та залежить від ефективності антен.

На практиці часто використовують логарифмічну форму цього рівняння, оскільки більшість вимірювань виконується у децибелах:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + G_t(\text{dBi}) + G_r(\text{dBi}) - FSPL(\text{dB}). \quad (10.2)$$

Втрати у вільному просторі визначаються як:

$$FSPL = 20 \log_{10}(R) + 20 \log_{10}(f) + 32.44, \quad (10.3)$$

де R задається у кілометрах, а f – у мегагерцах.

Ця формула дозволяє швидко оцінити ослаблення сигналу між передавачем і приймачем і є базовою для аналізу радіоканалів.

Коефіцієнт підсилення антени характеризує здатність антени концентрувати енергію в певному напрямку. Він визначається як відношення потужності, випроміненої антеною в заданому напрямку, до потужності ідеальної ізотропної

антени. У логарифмічній формі він задається у децибелах відносно ізотропного випромінювача (dBi). Чим більший коефіцієнт підсилення, тим ефективніше передається сигнал у заданому напрямку.

Рівень RSSI (Received Signal Strength Indicator) є безпосередньо вимірюваною величиною, що характеризує потужність сигналу на вході приймача. Він зазвичай виражається у дБм і фактично відповідає значенню P_r , отриманому експериментально. RSSI використовується як швидка оцінка якості сигналу, однак сам по собі не враховує вплив шумів і завад.

Для повного аналізу якості радіоканалу використовується відношення сигнал/завади+шум:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise} + P_{interf}}. \quad (10.4)$$

У децибелах це співвідношення записується як:

$$SINR_{dB} = P_{signal}(dBm) - 10 \log_{10}(P_{noise} + P_{interference}). \quad (10.5)$$

Цей параметр є ключовим для сучасних бездротових систем, оскільки визначає можливість використання складних видів модуляції та досягнення високих швидкостей передавання. Високе значення SINR відповідає стабільному каналу з низькою ймовірністю помилок, тоді як низьке значення свідчить про суттєвий вплив завад і погіршення якості зв'язку.

Таким чином, взаємозв'язок між потужністю передавача, втратами в каналі, підсиленням антен і рівнем завад дозволяє комплексно оцінити стан радіоканалу. Визначення потужності прийнятого сигналу, розрахунок втрат у просторі, аналіз рівня RSSI та обчислення SINR дають змогу не лише кількісно оцінити параметри системи, а й зробити висновок щодо її ефективності та придатності до експлуатації.

Вимірювання зазначених параметрів здійснюється за допомогою сучасних радіовимірювальних засобів, серед яких використовуються спектроаналізатори, векторні аналізатори сигналів, вимірювачі потужності, програмно-визначувані радіосистеми та вбудовані модулі вимірювання RSSI у приймальних пристроях. Для оцінювання SINR і параметрів завад застосовуються аналізатори сигналів, здатні розділяти корисний сигнал і шумові складові, а також спеціалізовані тестери бездротових систем, що дозволяють отримувати комплексну інформацію про стан радіоканалу в реальному часі.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Розрахунок параметрів радіоканалу та рівня RSSI

Передавач працює на частоті $f = 2.4$ ГГц із потужністю $P_t = 20$ дБм. Коефіцієнти підсилення антен становлять $G_t = 8$ дБі та $G_r = 2$ дБі. Відстань між антенами $R = 150$ м. За результатами вимірювання рівень шуму на вході приймача становить -90 дБм.

Необхідно визначити втрати у вільному просторі, потужність прийнятого сигналу, що відповідає рівню RSSI, а також обчислити відношення сигнал/шум у децибелах. На основі отриманих результатів слід зробити висновок щодо якості радіоканалу.

Задача 2. Аналіз радіоканалу з урахуванням завад

Для бездротової системи зв'язку задано: $P_t = 15$ дБм, $G_t = 5$ дБі, $G_r = 5$ дБі, частота $f = 1800$ МГц, відстань $R = 1$ км. За результатами вимірювань встановлено, що потужність завад становить -85 дБм, а шум -95 дБм.

Необхідно обчислити втрати у вільному просторі, визначити потужність сигналу на вході приймача, розрахувати SINR у децибелах і проаналізувати, як завади впливають на якість каналу порівняно з шумом.

Задача 3. Порівняльний аналіз двох радіоканалів

Розглядаються два варіанти радіоканалу на частоті $f = 900$ МГц.

Для першого варіанту: $P_t = 10$ дБм, $G_t = 2$ дБі, $G_r = 2$ дБі, $R = 500$ м, шум -92 дБм, завади -100 дБм. Для другого варіанту: $P_t = 10$ дБм, $G_t = 8$ дБі, $G_r = 8$ дБі, $R = 500$ м, шум -92 дБм, завади -85 дБм.

Необхідно для кожного варіанту визначити втрати у вільному просторі, потужність прийнятого сигналу, SINR, а також порівняти якість каналів. Потрібно пояснити, чому збільшення підсилення антен не завжди гарантує покращення якості зв'язку.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Оцінювання якості сигналу за модуляційними параметрами

Мета роботи: набуття студентами практичних навичок оцінювання якості цифрово-модульованого сигналу за результатами вимірювань у комплексній площині I/Q, зокрема визначення EVM, MER, аналізу похибки сузір'я, оцінювання дисбалансу I/Q та частотного зсуву, а також формування інженерного висновку щодо придатності сигналу до передачі інформації.

Теоретичні відомості

Якість цифрово-модульованого сигналу в сучасних телекомунікаційних системах оцінюють не лише за рівнем потужності або коефіцієнтом бітових помилок, а й за параметрами, що описують точність відтворення символів у комплексній площині I/Q. Під час модуляційного аналізу кожний прийнятий символ порівнюють з його еталонним положенням у сузір'ї. Відхилення між виміряним і опорним символом утворює вектор помилки, який є основою для розрахунку більшості показників якості модуляції.

Найуживанішим інтегральним параметром є EVM, або величина вектора помилки. Вона характеризує середньоквадратичне відхилення реального сигналу від ідеального та визначається як:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N |S_{meas,k} - S_{ref,k}|^2}{\sum_{k=1}^N |S_{ref,k}|^2}}. \quad (11.1)$$

Чим менше значення EVM, тим ближче виміряне сузір'я до ідеального, а отже, тим вища якість сигналу. Збільшення EVM може бути наслідком шуму, фазового шуму генераторів, нелінійності підсилювачів, частотного зсуву, міжсимвольних завад, багатопробеневого поширення або амплітудно-фазових перекосів тракту.

Параметр MER характеризує відношення потужності корисного модуляційного сигналу до потужності модуляційної помилки. Він визначається як:

$$MER = 10 \log_{10} \frac{\sum_{k=1}^N |S_{ref,k}|^2}{\sum_{k=1}^N |S_{meas,k} - S_{ref,k}|^2}. \quad (11.2)$$

Оскільки MER і EVM базуються на тих самих вимірних даних, між ними існує прямий зв'язок:

$$MER = -20\log_{10}(EVM_{RMS}). \quad (11.3)$$

Високе значення MER відповідає якісному сигналу, а низьке – значному рівню модуляційних спотворень. На відміну від звичайного SNR, MER описує саме якість відтворення модуляційного стану.

Похибка сузір'я для окремого символу визначається модулем вектора:

$$e_k = |S_{meas,k} - S_{ref,k}|. \quad (11.4)$$

Аналіз розподілу цих похибок дозволяє виявити характер спотворень. Якщо точки сузір'я розмиті приблизно симетрично, домінує шум. Якщо спостерігається систематичне зміщення або обертання всього сузір'я, причиною може бути частотний або фазовий зсув. Якщо сузір'я деформується нерівномірно по осях I та Q, це вказує на IQ дисбаланс. У практичних вимірюваннях окремо аналізують також амплітудну та фазну похибки як складові загального вектора помилки.

IQ дисбаланс є наслідком неідеальності квадратурного модулятора або демодулятора. Він означає, що канали I та Q мають різні коефіцієнти підсилення або не зовсім точний фазовий зсув між собою. Дисбаланс підсилення можна оцінити як:

$$\Delta G_{IQ} = 20\log_{10}\left(\frac{A_I}{A_Q}\right), \quad (11.5)$$

де A_I і A_Q – амплітуди сигналів у каналах I та Q.

Фазову неортогональність можна оцінити як:

$$\Delta\varphi_{IQ} = \varphi_{IQ} - 90^\circ. \quad (11.6)$$

За наявності цих похибок сузір'я стає асиметричним, що погіршує EVM і MER та підвищує імовірність помилки демодуляції. У професійних ці помилки часто виводяться як окремі результати.

Частотний зсув визначається як різниця між реальною частотою прийнятого сигналу та опорною частотою демодулятора:

$$\Delta f = f_{meas} - f_{ref}. \quad (11.7)$$

У комплексній площині цей зсув викликає обертання сузір'я, а відповідна фазова помилка зростає з часом:

$$\Delta\varphi(t) = 2\pi\Delta f t. \quad (11.8)$$

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Аналіз якості сигналу за сузір'ям

У системі передачі використовується QPSK-модуляція. За результатами вимірювання векторним аналізатором сигналів отримано такі дані: середньоквадратичне значення вектора помилки становить $EVM = 6\%$; потужність корисного сигналу $P_{signal} = -10$ дБм; середня потужність помилки $P_{error} = -32$ дБм; дисбаланс амплітуд каналів I та Q становить $A_I = 1.0$, $A_Q = 0.85$; фазовий зсув між каналами $\varphi_{IQ} = 86^\circ$; частотний зсув $\Delta f = 1.5$ кГц; тривалість символу $T_s = 50$ мкс.

Необхідно: обчислити значення MER, використовуючи співвідношення між потужністю сигналу та помилки, перевірити узгодженість між EVM і MER, визначити коефіцієнт дисбалансу I/Q у децибелах та оцінити фазову неортогональність каналів, обчислити фазову помилку, що накопичується за один символ внаслідок частотного зсуву, а також пояснити, які саме спотворення домінують у сигналі. На основі всіх параметрів потрібно зробити інженерний висновок щодо якості сигналу та можливості його коректної демодуляції.

Задача 2. Порівняльний аналіз двох сигналів у реальному каналі

Розглядаються два варіанти сигналу 16-QAM, отримані після проходження через різні канали.

Для першого сигналу виміряно: $EVM_1 = 4\%$, $P_{signal1} = -12$ дБм, $P_{error1} = -36$ дБм, частотний зсув $\Delta f_1 = 0.5$ кГц, дисбаланс I/Q: $A_I/A_Q = 1.05$, фазовий зсув 89° .

Для другого сигналу: $EVM_1 = 7\%$, $P_{signal1} = -12$ дБм, $P_{error1} = -29$ дБм, частотний зсув $\Delta f_1 = 3$ кГц, дисбаланс I/Q: $A_I/A_Q = 0.9$, фазовий зсув 84° .

Тривалість символу для обох сигналів $T_s = 20$ мкс.

Необхідно: для кожного сигналу обчислити MER, оцінити фазову помилку за один символ, визначити вплив частотного зсуву на обертання сузір'я, порівняти рівень IQ imbalance та пояснити його вплив на форму сузір'я, а також виконати комплексний аналіз якості сигналів. Потрібно обґрунтовано визначити, який сигнал є кращим, і пояснити, чому сигнал із відносно невеликим EVM може мати гірші експлуатаційні характеристики.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, згідно вказівок викладача, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

Практична робота 12

Розрахунок радіопокриття за результатами вимірювань

Мета роботи: набуття практичних навичок побудови емпіричної моделі втрат поширення за виміряними рівнями прийнятого сигналу, визначення показника загасання, прогнозування рівня сигналу та граничної відстані обслуговування, оцінювання запасу радіопокриття і порівняння інженерних рішень щодо розміщення та налаштування точок доступу.

Теоретичні відомості

Радіопокриття характеризує область, у межах якої приймач може забезпечувати заданий режим роботи за встановлених вимог до рівня корисного сигналу та його якості. Рівень сигналу залежить від відстані, частоти, висот і спрямованості антен, перешкод, затінення та багатопробеневого поширення. На відміну від розрахунку втрат у вільному просторі, емпірична модель дозволяє визначати закономірність ослаблення безпосередньо за виміряними даними конкретного середовища.

У цій роботі використовується логарифмічна модель середніх втрат поширення. Для опорної відстані d_0 вона має вигляд:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \cdot \log_{10}(d/d_0), \text{ дБ} \quad (12.1)$$

де $PL(d)$ – втрати поширення на відстані d ; $PL(d_0)$ – втрати на опорній відстані d_0 ; n – показник загасання, безрозмірна величина.

За незмінних потужності передавача, підсилення антен та інших складових енергетичного балансу модель рівня прийнятого корисного сигналу записується як:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \cdot \log_{10}(d/d_0). \text{ дБм} \quad (12.2)$$

Значення $P_r(d)$ у задачах означає виміряну потужність корисного сигналу на вході приймача (або відкалібрований показник його рівня). Показник RSSI у різних стандартах може охоплювати також завади й шум, тому без уточнення методики його не можна автоматично ототожнювати з потужністю лише корисного сигналу. У задачах наведені значення вважаються порівнюваними вимірюваннями одного й того самого корисного сигналу за незмінної конфігурації.

Для двох вимірювань на відстанях d_1 і d_2 , коли $d_2 > d_1$, показник загасання можна визначити безпосередньо:

$$n = [P_r(d_1) - P_r(d_2)] / [10 \cdot \log_{10}(d_2/d_1)]. \quad (12.3)$$

Якщо є кілька точок, доцільно оцінювати n за лінійною апроксимацією залежності $P_r = a + bx$, де $x = \log_{10}(d/d_0)$, $b = -10n$. Метод найменших квадратів для N пар вимірювань дає:

$$b = \Sigma[(x_i - \bar{x})(P_i - P)] / \Sigma(x_i - \bar{x})^2; \quad n = -b/10, \quad (12.4)$$

$$a = \bar{P} - b \cdot \bar{x}; \quad \hat{P}_r(d) = a + b \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (12.5)$$

Тут a – розрахунковий рівень на опорній відстані, який у загальному випадку може відрізнитися від окремого вимірювання $P_r(d_0)$; риска означає середнє значення. Такий підхід зменшує вплив локальних відхилень на оцінку середнього тренду, проте не усуває затінення та швидких завмирань.

Для визначення межі покриття використовують заданий пороговий рівень $P_{\min}$. Якщо необхідний додатковий запас M (дБ) для компенсації локальних погіршень, умовою проєктного покриття є $P_r(d) \geq P_{\min} + M$. За $n > 0$ розрахунковий радіус становить:

$$d_{\max} = d_0 \cdot 10^{\frac{a - P_{\min} - M}{10n}}. \quad (12.6)$$

Формула (12.6) визначає лише межу за рівнем сигналу в межах застосовності прийнятої моделі. Вона не гарантує потрібної швидкості передавання, BER або SINR. Прогноз за межами діапазону вимірюваних відстаней є екстраполяцією, тому його слід трактувати як орієнтовний.

За зміни еквівалентної випромінюваної потужності або інших незмінних складових балансу на ΔP дБ рівень прийнятого сигналу в межах тієї самої моделі змінюється на ΔP дБ, а відношення нового й початкового радіусів дорівнює:

$$\frac{d_2}{d_1} = 10^{\frac{\Delta P}{10n}}. \quad (12.7)$$

У разі оцінювання запасу за конкретною точкою використовують $M_{\text{avail}}(d) = P_r(d) - P_{\min}$. Якщо $M_{\text{avail}} \geq M$, вимога до запасу за рівнем сигналу виконується. Під час реального проєктування необхідно окремо перевіряти обмеження за завадами, навантаженням мережі, регуляторними вимогами до випромінювання та особливостями середовища.

Вимірювання для побудови моделі можуть бути отримані за допомогою аналізатора радіомереж, спеціалізованого приймача, вимірювального термінала або програмно-визначуваної радіосистеми. Для коректного порівняння потрібні однакові частота, смуга вимірювання, режим передавача, конфігурація антен та визначення вимірюваного показника. У цій практичній роботі методику збирання даних не відпрацьовують: аналіз виконують за наданими результатами.

Завдання до практичної роботи

Задача 1. Визначення показника загасання та прогнозування радіопокриття

Під час обстеження безпроводової мережі на частоті 2,4 ГГц отримано результати вимірювань потужності корисного сигналу на вході приймача за незмінної конфігурації обладнання. Відстані виміряно від передавальної антени. Для навчального розрахунку прийнято, що точки належать до однієї зони поширення, а локальні відхилення від середнього тренду можна описати залишками моделі.

Відстань d , м	10	20	40	80	160
Рівень P_r , дБм	-43	-52	-60	-69	-77

Необхідно: 1) для кожної точки обчислити $x_i = \log_{10}(d_i/10 \text{ м})$; 2) за методом найменших квадратів визначити коефіцієнти a, b та показник загасання n ; 3) записати отриману модель $P_r(d)$, розрахувати прогнозовані рівні на відстанях 100, 200 і 300 м; 4) для кожної виміряної точки визначити залишок $e_i = P_r(d_i) - P_r(d_i)$ і знайти найбільше за модулем відхилення; 5) за порогового рівня $P_{\min} = -82$ дБм визначити граничну відстань без додаткового запасу та із запасом $M = 6$ дБ; 6) оцінити, чи можна вважати прогноз на 300 м достатньо надійним, і сформулювати інженерний висновок щодо зони обслуговування.

Задача 2. Порівняння варіантів модернізації точки доступу

Для ділянки мережі за результатами попереднього обстеження встановлено модель середнього рівня корисного сигналу $P_r(d) = -48 - 32 \cdot \log_{10}(d/20)$, де d вимірюється в метрах, а P_r – у дБм. Модель отримана за сталої конфігурації антен і справедлива для досліджуваного середовища. Пороговий рівень приймання становить $P_{\min} = -80$ дБм, обов'язковий проєктний запас $M = 5$ дБ. Необхідно забезпечити покриття контрольної точки на відстані 150 м.

Розглядаються три варіанти: А – без змін; Б – збільшення допустимого рівня передаваного сигналу на 3 дБ без зміни інших параметрів; В – перенесення точки доступу так, що відстань до контрольної точки зменшиться до 90 м, причому умови

поширення та модель залишаються незмінними. Для навчального порівняння вважати, що варіант Б не порушує встановлених обмежень на випромінювання.

Необхідно: 1) визначити показник загасання n ; 2) розрахувати рівень сигналу та наявний запас у контрольній точці для всіх трьох варіантів; 3) перевірити виконання вимоги $P_r \geq P_{\min} + M$; 4) визначити проєктний радіус покриття для варіантів А і Б; 5) обчислити мінімальне підвищення рівня сигналу ΔP , необхідне у варіанті А для забезпечення вимоги на 150 м, та зіставити його з варіантом Б; 6) визначити, на скільки децибел зміниться рівень сигналу при перенесенні точки доступу зі 150 до 90 м; 7) обрати технічно доцільний варіант і пояснити, чому розрахунок лише за рівнем сигналу не є достатнім для гарантування якості послуги.

Виконати розрахункові завдання, використовуючи вихідні дані відповідно до свого варіанту, визначеного викладачем, та на основі отриманих результатів здійснити аналіз і сформулювати обґрунтований інженерний висновок щодо досліджуваних параметрів.

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. 50 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