

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра біотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Передача сигналів холтерівського моніторингу в комп'ютерних мережах

Виконав: студент II курсу, групи РБм-61

спеціальності 163 Біомедична інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Коваль А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Ткачук Р.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Дедів Л.Є.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Яворська Є.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Хвостівська Л.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра біотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Яворська Є.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 163 Біомедична інженерія  
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Ковалю Андрію Васильовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Передача сигналів холтерівського моніторингу в комп'ютерних мережах

Керівник роботи Ткачук Роман Андрійович, д.т.н., професор, професор кафедри БТ  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2023 року № 4/7-1083

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20.12.2023р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження: канали зв'язку, що використовуються для передачі кардіосигналів; Предмет дослідження: протоколи передачі та апаратне забезпечення каналів зв'язку, що використовуються для передачі дискретизованих кардіосигналів.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Аналітична частина.

4.2. Основна частина.

4.3. Науково-дослідна частина.

4.4. Спеціальна частина.

4.5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

4.6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

4.6.1 Актуальність роботи

4.6.2 Визначення необхідної швидкості передачі даних

4.6.3 Структурна схема

4.6.4 Загальні висновки

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.ф.-м.н, доцент кафедри ПВ Зелінський І.М.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. кафедри ОХ, Клепчик В.М.		

7. Дата видачі завдання 10.09.2023р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання до кваліфікаційної роботи	10.09.2023	Виконано
2.	Аналіз завдання	15.09.2023	Виконано
3.	Оформлення розділу 1	15.10.2023	Виконано
4.	Оформлення розділу 2	30.10.2023	Виконано
5.	Оформлення розділу 3	15.11.2023	Виконано
6.	Оформлення розділу 4	30.11.2023	Виконано
7.	Оформлення розділу 5	04.12.2023	Виконано
8.	Оформлення пояснювальної записки	08.12.2023	Виконано
9.	Оформлення презентаційного матеріалу	09.12.2023	Виконано
10.	Перевірка роботи на антиплагіат	19.12.2023	Виконано
11.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	19.12.2023	Виконано
12.	Захист кваліфікаційної роботи	26.12.2023	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Коваль А.В.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Ткачук Р.А.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Передача сигналів холтерівського моніторингу в комп'ютерних мережах // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Магістр» // Коваль Андрій Васильович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра біотехнічних систем, група РБм-61 // Тернопіль, 2023 // С. 99, рис. – 22, табл. – 2, додат. – -, бібліогр. – 41.

**Ключові слова:** кардіосигнал, холтерівський моніторинг, протокол, кодування, комутатор, дискретизація, канал зв'язку, інтерфейс, ЕОМ.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню передачі сигналів ХМ в комп'ютерних мережах. У даній роботі проведено відбір протоколів передачі і засобів для передачі дискретизованих КС через комп'ютерні мережі, а також надано огляд актуальних апаратних засобів, які застосовуються для надійної передачі інформації. Впровадження комп'ютерних мереж для передачі КС є важливим етапом у створенні системи дистанційного контролю за функцією серця людини.

## ANNOTATION

Transmission of Holter monitoring signals in computer networks // Qualification work of the educational level «Master» // Koval Andrii Vasylovych // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Biotechnical Systems Department, group RBm-61 // Ternopil, 2023 // P. \_\_\_\_, fig. – \_\_\_\_, tabl. – \_\_\_\_, annexes. – \_\_\_\_, references – \_\_\_\_.

**Keywords:** cardiac signal, Holter monitoring, protocol, coding, switch, discretization, communication channel, interface, computer.

The qualification work is dedicated to the study of the transmission of Holter monitoring signals in computer networks. In this work, the selection of transmission protocols and means for transmitting sampled cardiac signals over computer networks was carried out, and an overview of current hardware used for reliable information transmission was provided. The introduction of computer networks for transmitting cardiac signals is an important step in creating a system for remote monitoring of human heart function.

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ**

ARP (англ. Address Resolution Protocol) – Протокол визначення адрес.

ARPAnet (англ. Advanced Research Projects Agency Network) – Мережа передових досліджень.

DNS (англ. Domain Name System) – Система доменних імен.

ICMP (англ. Internet Control Message Protocol) – Міжмережевий протокол керуючих повідомлень.

IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості.

IP (англ. Internet Protocol) – Міжмережевий протокол.

LAN (англ. Local Area Network) – Локальна комп'ютерна мережа.

MAC (англ. Media Access Control) – управління доступом до посередників

MTU (англ. Maximum Transmission Unit) – Максимальна одиниця передачі.

MUX (англ. Multiplexor) – Мультиплексор.

OSI (англ. Open Systems Interconnection model) – Семирівнева концептуальна модель комп'ютерної мережі з вертикальною структурою.

RFC (англ. Request for Comments) – Документ із серії пронумерованих інформаційних документів Інтернету, що містить технічні специфікації та Стандарти, має широке застосування у всесвітній мережі.

TCP (англ. Transmission Control Protocol) – Протокол управління передачею.

UDP (англ. User Datagram Protocol) – Протокол датаграм користувача.

WAN (англ. Wide Area Network) – глобальна комп'ютерна мережа.

АІМ – амплітудно-імпульсна модуляція.

АКФ – автокореляційна функція.

АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика.  
БД – база даних.  
ВЗ – вузол зв'язку.  
ВП – випадковий процес.  
Гц – герц.  
дБ – дицибел.  
ДМ – добовий моніторинг.  
ДС – джерело сигналу.  
ЕКГ – електрокардіографія.  
ЕКС – електрокардіосигнал.  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.  
ІКМ – імпульсно-кодова модуляція.  
ІС – інформаційна система.  
КЗ – канал зв'язку.  
КМ – кардіомонітор.  
КП – кардіопідсилювач.  
КС – кардіосигнал.  
ЛЗ – лікарські засоби.  
мВ – мілівольт.  
мкВ – мікровольт.  
ОС – операційна система.  
ПВС – псевдовипадковий сигнал.  
ПК – персональний комп'ютер.  
СЩП – спектральна щільність потужності.  
ФВЧ – фільтр високих частот.  
ФНЧ – фільтр низьких частот.  
ХМ – холтерівський моніторинг.  
ЦКЗ – цифровий канал зв'язку.  
ЦОС – цифрова обробка сигналів.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	13
1.1 Вимоги до електрокардіографів .....	13
1.2 Вимоги до добового моніторингу ЕКГ .....	15
1.3 Типові схемні рішення електрокардіографів .....	17
1.4 Типове схемне рішення ДМ ЕКГ .....	19
1.5 Обмеження і недоліки типових схемних рішень для цифрових електрокардіографів .....	20
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА .....	22
2.1 Дискретизація неперервних сигналів як джерело похибки при передачі даних .....	22
2.1.1 Математична модель неперервного повідомлення .....	24
2.1.2 Гранична дискретизація безперервних повідомлень з обмеженим спектром .....	27
2.1.3 Дискретизація з урахуванням реальних способів відновлення .....	30
2.1.4 Дискретизація безперервних повідомлень за рівнем (квантування) .....	33
2.2 Граничні можливості систем передачі цифрової інформації. Вибір виду сигналів .....	35
2.3 Завадостійке кодування .....	40
2.3.1 Манчестерське кодування .....	43
2.3.2 Способи контролю правильності передачі даних. Код Хемінга .....	44
2.4 Визначення необхідної швидкості передачі даних .....	44
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА .....	46
3.1 Принципи побудови мереж .....	46
3.1.1 Локалізація трафіка й ізоляція мереж .....	46
3.1.2 Узгодження протоколів канального рівня .....	47
3.1.3 Маршрутизація в мережах з довільною топологією .....	47



3.1.4	Мережний рівень і модель OSI.....	48
3.1.5	Функції мережного рівня .....	49
3.1.6	Протоколи передачі даних і протоколи обміну маршрутною інформацією.....	49
3.2	Стек протоколів TCP/IP .....	50
3.2.1	Історія й перспективи стека TCP/IP .....	50
3.2.2	Структура стека TCP/IP. Коротка характеристика протоколів...50	
3.3	Адресація в IP-мережах.....	51
3.3.1	Типи адрес: фізичний (MAC-адреса), мережний (IP-адреса) і символний (DNS-ім'я) .....	51
3.3.2	Три основних класи IP-адрес .....	51
3.3.3	Відображення фізичних адрес на IP-адреси: протоколи ARP й RARP .....	52
3.3.4	Відображення символних адрес на IP-адреси: служба DNS .....	53
3.3.5	Автоматизація процесу призначення IP-адрес вузлам мережі – протокол DHCP .....	53
3.4	Протокол міжмережевої взаємодії IP .....	54
3.4.1	Формат пакета IP.....	54
3.4.2	Керування фрагментацією .....	55
3.4.3	Маршрутизація за допомогою IP-адрес.....	55
3.4.4	Фіксована маршрутизація .....	56
3.4.5	Проста маршрутизація.....	57
3.4.6	Адаптивна маршрутизація .....	57
3.4.7	Приклад взаємодії вузлів з використанням протоколу IP .....	57
3.4.8	Структуризація мереж IP за допомогою масок.....	58
3.5	Протокол доставки користувачьких дейтаграм UDP .....	59
3.5.1	Зарезервовані й доступні порти UDP.....	59
3.5.2	Загальна характеристика протоколу ICMP .....	59
3.5.3	Луна-протокол.....	61
3.5.4	Повідомлення про недосяжність вузла призначення .....	61

3.5.5	Перенапрямок маршруту.....	61
3.5.6	Дистанційно-векторний протокол RIP .....	61
3.6	Протокол надійної доставки повідомлень TCP .....	62
3.6.1	Сегменти TCP .....	62
3.6.2	Порти й встановлення TCP-з'єднань .....	62
3.6.3	Концепція квітирування .....	63
3.6.4	Реалізація ковзного вікна в протоколі TCP .....	63
3.6.5	Вибір тайм-ауту.....	64
3.6.6	Реакція на перевантаження мережі .....	64
3.6.7	Формат повідомлень TCP.....	64
3.7	Що таке комутатор Ethernet? .....	65
3.7.1	Повторювачі .....	65
3.7.2	Мости й маршрутизатори.....	65
3.7.3	Перемикання портів.....	65
3.8	Атрибути комутаторів Ethernet .....	66
3.8.1	Віртуальні з'єднання.....	66
3.8.2	Одночасні з'єднання .....	67
3.8.3	Продуктивність комутатора.....	69
3.8.4	Швидкість передачі між портами.....	69
3.8.5	Загальна пропускна здатність .....	69
3.8.6	Затримка.....	69
3.9	Порівняння мережних пристроїв .....	70
3.9.1	Повторювачі .....	70
3.9.2	Мости.....	70
3.9.3	Маршрутизатори .....	71
3.10	Класи комутаторів .....	71
3.10.1	Комутатори для робочих груп .....	71
3.10.2	Магістральні комутатори .....	71
3.10.3	Переваги комутаторів Ethernet .....	72
3.11	Застосування комутаторів.....	72

3.11.1Об'єднання концентраторів 10Base-T за допомогою магістрального комутатора .....	72
3.11.2Виділена смуга для кожного користувача.....	73
3.11.3Робочі групи з декількома серверами .....	73
3.11.4Робочі групи з архітектурою клієнт-сервер .....	73
3.11.5Об'єднання комутаторів робочих груп і корпоративних серверів	73
3.12 Висновок до розділу 3 .....	74
РОЗДІЛ 4. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА. ....	76
4.1 Методи і засоби випробувань сучасних цифрових холтерів (CardioSens (ХАІ-Медика)).....	76
4.2 Загальний опис методики оцінки амплітудно-частотних характеристик багатоканальних цифрових холтерів .....	81
4.3 Методи оцінок спектральної густини потужності сигналу.....	84
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	89
5.1 Питання щодо охорони праці .....	89
5.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях	<b>Помилка! Закладку не ви</b>
5.3 Висновки до розділу .....	90
ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ .....	92
ДОДАТКИ	

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вивчення функціонування серця людини є однією з найсуттєвіших галузей сучасної медичної науки. Вивчення відхилень, механізмів їх походження та розробка засобів лікування та запобігання серцевим захворюванням – основні аспекти кардіології. Вирішення цих завдань не під силу без застосування підходящого устаткування. Наприклад, застосування кардіографії високої роздільної здатності виявило раніше невідомі патології, які не було можливо діагностувати за допомогою стандартних ЕКГ. З розвитком кардіологічного обладнання появилась значна кількість КМ, різноманітних електродів, та технологій дослідження й обробки ЕКС. Вчені-кардіологи визначили, що для більш детального аналізу патологій необхідно проводити продовжений моніторинг серцево-судинної активності впродовж 1-2 діб, оскільки у деяких випадках складно об'єктивно оцінити стан хворого протягом тривалого періоду спокою. Це обумовлено тим, що ознаки патології з'являються лише в певних умовах, таких як фізичне або емоційне навантаження. Також такий ДМ важливий при лікуванні хворих кардіологічного профілю з метою точного визначення доз ЛЗ. Для забезпечення постійного моніторингу серцевої діяльності застосовується КМ Холтера, який спочатку виступав у ролі переносного магнітофону та пристрою для реєстрації КС. Швидкість запису магнітофона налаштовувалася на надзвичайно низький рівень, а сам пристрій закріплювався спільно з компактним КП та електродами на тілі пацієнта. Отож, пацієнт отримував можливість вільного руху, і моніторинг його серцевої діяльності здійснювався цілодобово, як вдома, так і в умовах виробництва.

Не зважаючи на це, перша модель КМ Холтера виявилася досить об'ємною, і, крім того, часто доводилося замінювати елементи живлення й касети, що призводило до певних труднощів.

Із впровадженням мікропроцесорної техніки та напівпровідникових технологій розміри КМ Холтера суттєво зменшились. Магнітофон було

замінено мікросхемами FLASH-пам'яті, а КП із аналоговими фільтрами став інтегральним, а фільтри – цифровими. Однак головним недоліком КМ Холтера є відсутність можливості нагляду за серцевою діяльністю у будь-який момент, коли це потрібно лікареві. Це особливо важливо для пацієнтів, які мали серцеві операції або вживають кардіостимулятори. Хоча КМ реєструє аритмію, лікар може їх визначити лише при пред'явленні пацієнтом записів КМ у діагностичний центр.

Особливо значущим є врахування причин порушень ритму серця в реальному часі, а не через 2 доби, що може призвести до більш об'єктивної оцінки обставин.

Вирішення вказаної проблеми можливе завдяки створенню системи дистанційного моніторингу функції серця пацієнта.

Постійний нагляд за кардіологічними пацієнтами може бути забезпечений централізованою системою збору даних із кардіологічних палат. Стан пацієнтів контролюється через контрольний термінал лікаря, і в разі виявлення аномалій ПК автоматично відправляє сигнал тривоги та надає дані про пацієнта з БД, що перебуває в палаті.

Іншим методом контролю є передача інформації про функціонування серця по радіоканалу з подальшою обробкою на ЕОМ.

Використання ХМ є важливим при контролі за фізичними навантаженнями спортсменів, у випадку хворобливих станів та для наукових досліджень в галузі кардіології.

Впровадження таких систем передбачає використання лінійних засобів зв'язку, зокрема комп'ютерних мереж.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Магістр» є визначення найоптимальнішого протоколу передачі та апаратних засобів для ефективною передачі КС через КЗ; розгляд методів підвищення стійкості КЗ та використання кодування інформації для збільшення їхньої стійкості до перешкод; огляд актуального апаратного забезпечення для КЗ.

**Об'єкт дослідження.** КЗ, які використовуються для передачі КС.

**Предмет дослідження.** Стек протоколу TCP-IP та апаратне забезпечення КЗ, які застосовуються для передачі КС.

**Методи дослідження.** Аналіз існуючих систем Холтерівського моніторингу та комп'ютерних мереж.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати даного дослідження становлять основу для розробки фактичної системи дистанційного моніторингу серцевої діяльності людини.

**Особистий внесок.** Враховуючи необхідність передачі дискретизованих КС з відповідною швидкістю, були вибрані протоколи передачі даних, які найбільш оптимальні для вирішення поставленої задачі. Крім того, були проаналізовані та узагальнені відомості щодо існуючих протоколів передачі дискретної інформації, здійснено порівняльний аналіз засобів апаратного забезпечення та лінійних КЗ.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Вимоги до електрокардіографів

У стандартних цифрових ЕКГ з багатьма каналами формування композиції з дванадцять типових відведень здійснюється через вхідну комутацію перед диференціальними підсилювачами з низьким рівнем шуму, і обчислення проводяться за допомогою дільників напруги, що ґрунтуються на точних резисторах. У цій схемі реєструються потенціали з правої руки ( $R$ ), лівої руки ( $L$ ), лівої ноги ( $F$ ) та 6-ти точок від правого краю грудини до лівої середньопахової лінії ( $C1 - C6$ ). З урахуванням виявлених потенціалів обчислюються подальші відведення:

- Основні ( $I = L - R$ ,  $II = F - R$ ,  $III = F - L$ ).
- Посилені ( $aVR = R - \frac{L+F}{2}$ ,  $aVL = L - \frac{R+F}{2}$ ,  $aVF = L - \frac{R+L}{2}$ ).
- Грудні ( $V_i = C_i - \frac{R+L+F}{3}$ ,  $i = 1 \dots 6$ ).

При використанні даної схеми, зазвичай використовується додатковий електрод на правій нозі  $N$ , який гарантує нульовий потенціал для аналогового сигналу. Він може служити для вводу сигналу в протифазі на тіло пацієнта, отриманого внаслідок перетворення 1 чи кількох вхідних потенціалів. Суттєво, цей сигнал виступає як аналог низькочастотного адаптивного фільтра, розробленого для компенсації високо-амплітудних синфазних перешкод, зокрема від електромережі.

Згідно з ДСТУ [21], вхідний ЕКС при повному розмаху 5 мВ від піка до піка може містити постійну складову до 300 мВ. Головна причина цього обмеження полягає у необхідності урівноваження міжелектродних потенціалів, які появляються при з'єднанні електродів [22, 23, 24]. Важливо відзначити, що у модерних електродах з  $AgCl$  міжелектродний потенціал становить лише кілька мВ.

ЕКГ вимагає оптимального діапазону частот 0,05-120 Гц, зокрема важлива нижня частота для уникнення перекручень сигналів. При короткому часі фіксації менше 3.2с можливі викривлення низькочастотного S-T інтервалу, що впливає на діагностику міокардіальних змін та правильність визначення інфаркту. Важливо використовувати фільтри, такі як антитреморний ФНЧ і режекторний фільтр на 50/60 Гц, для подолання електроміографічних і мережевих перешкод. ЕКГ повинен включати ФВЧ та ФНЧ для оптимальної якості сигналу.

Частоту дискретизації слід встановлювати не менше ніж удвічі вище верхньої межі пропускання. Зазвичай обирається частота 500 Гц, рекомендована Американською асоціацією кардіологів [28, 29, 30]. Роздільна здатність за амплітудою повинна становити не менше 5 мкВ для забезпечення ефективної обробки кардіокривих [31] та точного відтворення ЕКГ на екрані чи у фізичному вигляді.

Для регулювання різних постійних часів сигналу використовується перемикаючий ФВЧ. Необхідний спад АЧХ на високих частотах забезпечується за допомогою ФНЧ не менше 2-го порядку. Теоретично це відбувається на частоті, що дорівнює половині частоти дискретизації. Важливо уникати перевищення рівня, що відповідає меншому значущому розряду АЦП, щоб уникнути ефекту накладання спектрів [32]. Аналоговий тракт повинен мати загальний коефіцієнт підсилення близько 1000. Отже, 12-канальна система повинна включати 12 трактів підсилення, кожен має принаймні три активні елементи, а також 12-канальний MUX і 12-розрядний АЦП. Після цього ЦОС, мікроконтролер чи ЕОМ обробляє дані [33,34].

Існує метод оптимізації апаратних витрат, при якому ЕКГ для синхронного знімання 12 стандартних відведень будується на основі 8-канальної схеми. З огляду на те, що з 12 відведень лише 8 є лінійно незалежними [35], з схеми виключають 4 канали, що призводить до півтораразового зменшення кількості аналогових трактів і дозволяє використовувати відомі 8-канальні MUX чи АЦП з вбудованими MUX. Для



прикладу, апаратні відведення  $III$ ,  $aVR$ ,  $aVL$ ,  $aVF$  виключають і обчислюють програмно, використовуючи наступні формули:

$$III = II - I, aVR = -\frac{II+I}{2}, aVL = \frac{2I-II}{2}, aVF = \frac{2II-I}{2}. \quad (1.1)$$

Проте дане вирішення передбачає скорочення інтервалу між вимірюваннями на різних каналах. У випадку, якщо цей інтервал перевищує 15-20 мкс, спостерігається вкривлення високочастотних компонентів сигналу на обчислених відведеннях через фазові зсуви. Така ситуація вимагає використання високошвидкісних МUX та АЦП, а також забезпечення швидкого транспорту результатів АЦП до обчислювача чи буфера проміжної пам'яті. Останнє, в цілому, стає нетривіальною задачею, особливо при врахуванні того, що використання цифрових ліній для гальванічного розв'язання, наприклад, за допомогою оптичного чи індуктивного зв'язку з низькою швидкістю передачі даних, може бути більш зручним.

ЦОС виступає як основний принцип у створенні функціональної структури сучасних багатоканальних ЕКГ. Ефективність ЦОС в значній мірі характеризується якістю АЦП, яка, в свою чергу, великою мірою залежить від якості відбору ЕКС. Зазвичай для цього застосовують інструментальні підсилювачі та аналогову фільтрацію [36, 37, 38].

## 1.2 Вимоги до добового моніторингу ЕКГ

У документі, що охоплює обладнання для амбулаторного моніторингу, АСС/АНА (American College of Cardiology and American Heart Association – Американський коледж кардіології та Американська асоціація кардіологів) [38], подаються ключові вказівки щодо вибору ДМ ЕКГ.

Невід'ємною умовою для ДМ ЕКГ є наявність повного запису протягом усього періоду спостереження, який триває 24 год. Це надає лікареві можливість оцінити всі аспекти життєдіяльності пацієнта, перевірити достовірність автоматичного аналізу та мати повну впевненість у точності

свого висновку. При скороченні тривалості спостереження знижується чутливість методу, що ускладнює оцінку, наприклад, циркадного ритму серцевої діяльності. За останній час, все більше уваги приділяється багато ДМ ЕКГ (протягом 2 діб і більше). Цей метод необхідний для виявлення рідкісних порушень, які не відзначаються кожного дня, або при виборі та контролі антиаритмічної терапії. Для прикладу, для виявлення ішемічних епізодів рекомендується 48-годинний моніторинг. Фрагментарні монітори, які реєструють лише епізоди з виявленими порушеннями, більше не виробляються в розвинених країнах. Такі монітори можуть використовуватися лише для первинного огляду або повторного обстеження для контролю, оскільки лікар не може перевірити правильність аналізу та детально оглянути ЕКГ в будь-який момент.

Важливим параметром для реєстратора є кількість записуваних відведень ЕКГ. Зазвичай, при ДМ ЕКГ фіксується 2 або 3 біполярні відведення. Кількість каналів у ДМ ЕКГ обумовлюється цілями такого моніторингу. Здебільшого достатньо використовувати 2 канали ЕКГ, причому в оптимальній конфігурації вони виявляють лише на 2% менше інформації, ніж система з трьома відведеннями. Проте для ефективної діагностики ішемії 2 відведення часто не достатньо. Для поліпшення точності виявлення рекомендується використовувати 3 відведення ЕКГ, зокрема для оцінки порушень проведення внутрішньошлуночкового імпульсу та локалізації ішемічних змін.

Якість реєстрації ДМ ЕКГ напряму залежить від частотного діапазону та розрядності АЦП. Мінімальна ширина смуги пропускання сьогочасного ДМ ЕКГ повинна становити від 0,1 до 35 Гц, а роздільна здатність – від 5 до 10 мкВ. Наприклад, це необхідно для ефективної оцінки компонентів ЕКГ низької амплітуди, таких як хвиля Р чи сегмент ST. Монітори з роздільною здатністю в межах 20-40 мкВ можуть використовуватись лише для виявлення порушень ритму. ДМ ЕКГ повинен забезпечити надійну реєстрацію без стиску та втрати інформації, уникати перекручувань при стиску. Важливим параметром є вхідний діапазон реєстрації ЕКГ, оскільки амплітуда QRS-комплексу може

досягати 4-5 мВ. Забезпечення амплітудного діапазону не менше +5-10 мВ дозволяє уникнути виходу сигналу за межі реєстрації внаслідок можливих високоамплітудних змін вхідного сигналу, спричинених рухами пацієнта.

Запис в системах ДМ ЕКГ виконується у цифровому форматі, який може бути збережений в електронній пам'яті чи на магнітній стрічці. Зараз все частіше використовують цифрові носії інформації, оскільки вони, на відміну від магнітної стрічки, не схильні до перешкод від електромотора привода та не піддані дефектам стрічки. Раніше магнітна стрічка користувалася популярністю через те, що перші цифрові реєстратори, які використовували звичайну статичну пам'ять, були менш надійними (запис ЕКГ міг бути втрачений при повному розряді батареї). Хоча деякі компанії за кордоном, продовжують випускати ДМ ЕКГ на магнітній стрічці, але масове відмовлення від її використання розпочалося з появою твердотільної енергонезалежної флеш-пам'яті наприкінці 80-х років. Ця технологія може зберігати ЕКГ при відключенні живлення до 10 років і має від 100 тис. до 1 млн. циклів запису.

ДМ ЕКГ має відповідати принципам ергономіки. Наявність кнопки подій, яка дозволяє пацієнту відзначати моменти зміни самопочуття, є необхідною. У ДМ ЕКГ слід використовувати широко розповсюджені типи живлення. Акумулятори є зручним та економічним варіантом, оскільки їх можна перезаряджати. Розміри та вага реєстраторів визначають зручність їх переносу. Таким чином, сучасні ДМ ЕКГ повинні бути компактними та легкими для зручності пацієнтів.

### **1.3 Типові схемні рішення електрокардіографів**

Розглянемо узагальнену структурну конфігурацію, яка зображена на рисунку 1.1 [11, 17, 18, 37], як типове рішення. Схема для формування 12 стандартних відведень використовує вхідну комутацію перед низькошумними диференційними підсилювачами, а розрахунки здійснюються з використанням дільників напруги, що базуються на точних резисторах.

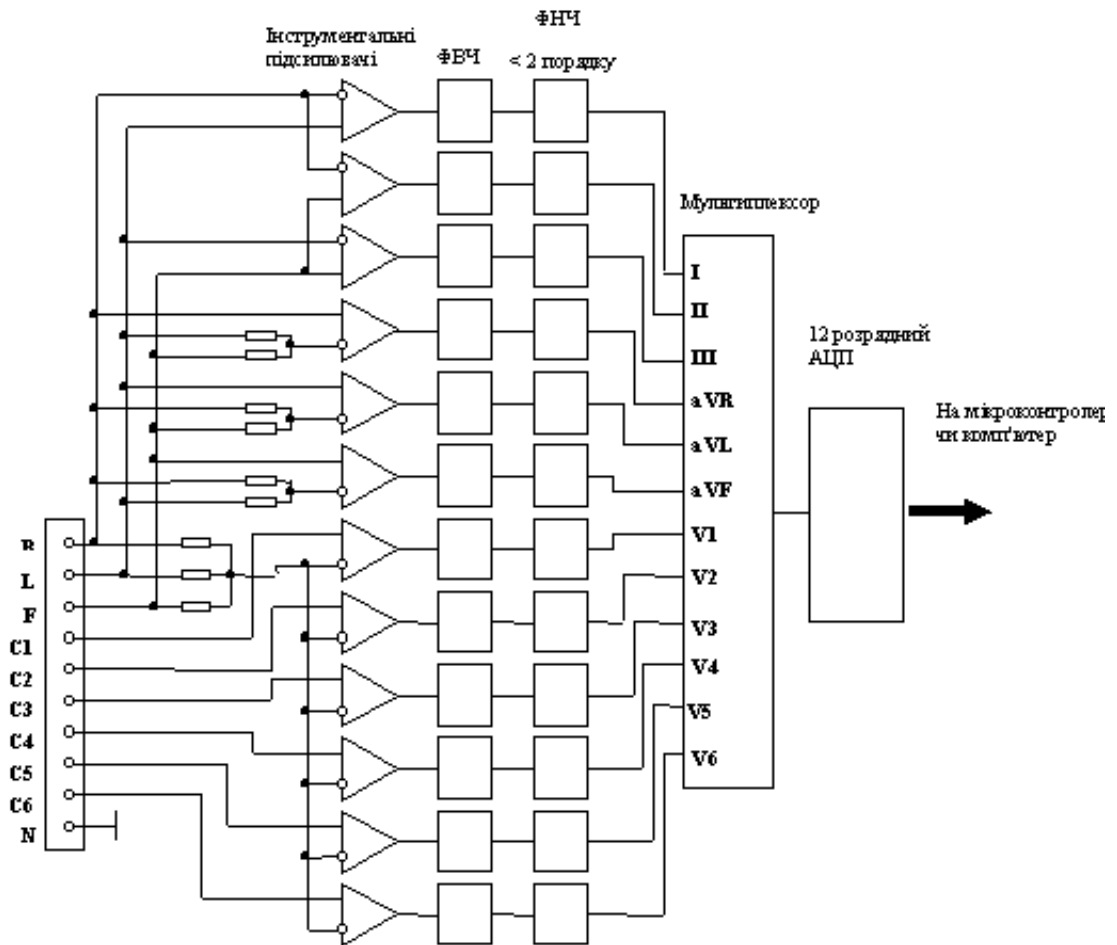


Рисунок 1.1 – Стандартна структурна схема цифрового апарату ЕКГ з 12 каналами

У цій схемі реєструються потенціали з правої кінцівки ( $R$ ), лівої кінцівки ( $L$ ), лівої ноги ( $F$ ) та 6-ти точок, розташованих від правого краю грудної клітки до лівої середньопідпахової лінії ( $C1 - C6$ ). З урахуванням виявлених потенціалів обчислюються подальші відведення:

- Основні ( $I = L - R$ ,  $II = F - R$ ,  $III = F - L$ ).
- Посилені ( $aVR = R - \frac{L+F}{2}$ ,  $aVL = L - \frac{R+F}{2}$ ,  $aVF = L - \frac{R+L}{2}$ ).
- Грудні ( $V_i = C_i - \frac{R+L+F}{3}$ ,  $i = 1 \dots 6$ ).

При використанні даної схеми, зазвичай використовується додатковий електрод на правій нозі  $N$ , який гарантує нульовий потенціал для аналогового сигналу. Він може служити для вводу сигналу в протифазі на тіло пацієнта,

отриманого внаслідок перетворення 1 чи кількох вхідних потенціалів. Суттєво, цей сигнал виступає як аналог низькочастотного адаптивного фільтра, розробленого для компенсації високо-амплітудних синфазних перешкод, зокрема від електромережі.

#### 1.4 Типове схемне рішення ДМ ЕКГ

Загальна структурна схема [18, 19, 13, 37] аналогової складової стандартного обладнання для ДМ ЕКГ наведена на рисунку 1.2. Використані вхідні інструментальні підсилювачі здатні ефективно приглушити синфазні завади на рівні 100 дБ і більше. Підсилювачі з низьким вхідним струмом застосовуються для забезпечення високого вхідного опору, що становить декілька десятків МОм, значно перевищуючи опір ДС. Значення опору приладу не розглядається, оскільки воно набагато перевищує опір ДС. Коефіцієнт підсилення інструментального підсилювача в декілька разів забезпечує передпідсилення сигналу ЕКГ. Невелике підсилення використовується для забезпечення вхідного діапазону трохи стільникових мВ, що вимагається відповідно до вимог ДСТУ [21], урахуваючи наявність поляризації електродів [39].



Рисунок 1.2 – Структурна схема аналогового блоку стандартного ДМ ЕКГ

Амплітуда ЕКГ сигналу, що становить лише кілька мВ, складає невелику частину вхідного діапазону. ФВЧ рекомендований для виділення змінної складової ЕКГ сигналу, аби забезпечити його подальше підсилення. Щоб

зменшити вплив перекручень низькочастотних компонентів ЕКГ сигналу, частота зрізу ФВЧ має бути мінімальною. Після цього ЕКГ сигнал піддається підсиленню в декілька сотень разів, щоб отримати задовільну роздільну здатність для АЦП, з вхідним діапазоном, який зазвичай становить +5 мВ. В разі рухів пацієнта або зовнішніх перешкод можливі виходження сигналу за межі вимірювань. Час встановлення ФВЧ з нижньою частотою 0,05 Гц становить декілька секунд, під час яких відбувається пропуск даних. Для швидкого встановлення ФВЧ використовують спеціальні схеми. Після підсилення, ФНЧ обмежує спектр аналогового сигналу до половини частоти дискретизації для виконання умов теореми Котельникова [40, 32]. Для ефективного приглушення застосовується ФНЧ високого порядку [41]. МУХ на вході АЦП вибирає канал ЕКГ, а час перетворення АЦП у цій схемі повинен складати кілька десятків мікросекунд для забезпечення синхронності дискретизації сигналу. Додатковий електрод задіюється для утримання потенціалу, що врівноважує, у аналоговому блоку приладу. Через цей електрод може подаватися сигнал у протифазі для компенсації високоамплітудного наведення, зокрема від електромережі (50/60 Гц).

### **1.5 Обмеження і недоліки типових схемних рішень для цифрових електрокардіографів**

Можна визначити наступні ключові обмеження та недоліки, притаманні традиційному підходу до розробки аналого-цифрового тракту:

- Складність використання інструментальних вхідних підсилювачів для ефективного приглушення синфазних перешкод.
- Використання прецизійних резисторів у вхідному каскаді схеми формування відведень.
- Можливість виходу аналогового сигналу за межі діапазону дискретизації АЦП при артефактах, рухах пацієнта чи зовнішніх перешкод. Для прикладу, час встановлення ФВЧ із нижньою частотою 0,05 Гц перевищує 3 с.

- Вимагає використання прецизійних великогабаритних конденсаторів із малими струмами витоку у аналоговому ФВЧ.
- Потребує додаткового каскаду підсилення після ФВЧ через обмежену розрядність АЦП.
- Наявність схем вибірки-зберігання та MUX перед входом 8-12-бітного АЦП, які можуть викликати додаткові нелінійні перекручування та фазові міжканальні зсуви.

## РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Дискретизація неперервних сигналів як джерело похибки при передачі даних

Основна ідея дискретизації в часі полягає у заміні неперервного сигналу послідовністю його миттєвих відліків взятих в дискретних моментах часу (див. рис. 2.1). Під час цієї заміни виключається розгляд будь-якої нескінченної кількості значень безперервної функції часу, що лежать всередині інтервалів часу. Отримана таким чином функція представляє собою послідовність відліків, взятих в дискретні моменти часу.

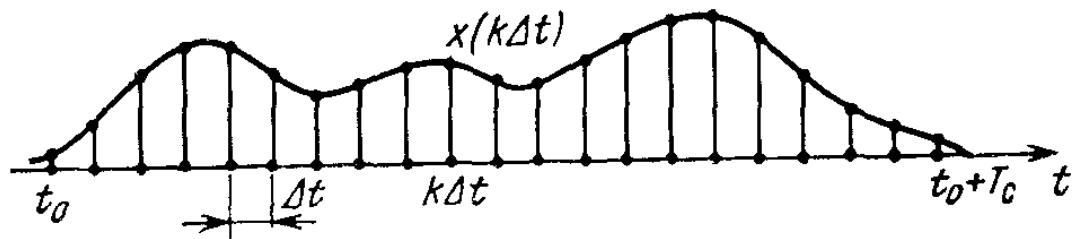


Рисунок 2.1 – Послідовність миттєвих відліків в дискретних моментах часу

Дискретизація в часі може бути рівномірною, коли інтервал дискретизації  $\Delta t$  залишається сталим, або нерівномірним, коли інтервал  $\Delta t$  змінюється відповідно до змінних характеристик повідомлення, таких як швидкість зміни повідомлення в часі.

Математичний опис дискретизації неперервних функцій у часі [3, 4, 5] базується на імпульсній функції дискретизації, відомій як  $\alpha(t)$ . Ця функція представляє собою періодичну послідовність  $\delta$ -функцій (функцій Дірака), які виникають через інтервали часу  $\Delta t$ .

$$\alpha_D(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - k\Delta t) \quad (2.1)$$

Цю функцію називають вибірковою.



Використовуючи теорему про перетворення Фур'є, можна довести, що спектр імпульсної функції дискретизації визначається формулою

$$A_D(f) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{\Delta t}\right) \quad (2.2)$$

Ця формула представляє собою періодичну послідовність  $\delta$ -функцій, що виникають на частотних інтервалах  $\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$ . Важливо відзначити, що відповідно до властивостей  $\delta$ -функцій

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \xi_0) d\xi = 1 \quad (2.3)$$

площа кожної компоненти у формулі 2.1 рівна одиниці, тоді як у формулі 2.2 вона визначається значенням  $\frac{1}{\Delta t}$ . Ці площі відображають вагу  $\delta$ -функцій.

Дискретизація неперервної функції часу  $x(t)$  з математичної точки зору означає перемноження цієї функції на імпульсну функцію  $\alpha(t)$ ,

$$x_D(t) = x(t)\alpha_D(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - k\Delta t) \quad (2.4)$$

Згідно з фільтруючою властивістю  $\delta$ -функцій, яку можна виразити співвідношенням:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(\xi)\delta(\xi - \xi_0)d\xi = x(\xi_0) \quad (2.5)$$

отримуємо:

$$x(t)\delta(t - k\Delta t) = x(k\Delta t)\delta(t - k\Delta t) \quad (2.6)$$

Це вказує на те, що операція множення функції  $x(t)$  на одиничний  $\delta$ -імпульс призводить до того, що площа цього імпульсу дорівнює значенню функції  $x(t)$  у момент часу  $t = k\Delta t$ . Цю площу часто називають ваговим коефіцієнтом  $\delta$ -імпульсу. Інакше кажучи, множення  $x(t)$  на одиничний  $\delta$ -імпульс відповідає отриманню відліку функції  $x(t)$  у момент  $t = k\Delta t$ .

Ураховуючи формулу 2.5, формула 2.3 набуває вигляду:

$$x_d(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t)\delta(t - k\Delta t). \quad (2.7)$$

Таким чином, перемноження повідомлення  $x(t)$  на імпульсну функцію дискретизації спричиняє формування періодичної послідовності  $\delta$ -імпульсів, ваги яких відповідають миттєвим значенням повідомлення в моменти часу  $t = k\Delta t$  та в моменти відліків.

Технічно дискретизацію безперервного повідомлення реалізують за допомогою ключових пристроїв, які керуються періодичною послідовністю коротких прямокутних імпульсів. При цьому тривалість відліків є кінцевою, оскільки вони не обираються в одній точці, а в деякому інтервалі часу, що дорівнює тривалості імпульсу  $\tau$ . Вибір величини  $\tau$  так, щоб виконувалася умова  $\frac{\tau}{\Delta t} \ll 1$ , призводить до утворення послідовності коротких імпульсів, амплітуди яких пропорційні миттєвим значенням повідомлення.

Практичну реалізацію дискретизації за часом здебільшого називають імпульсним перетворенням безперервного повідомлення. Такий підхід еквівалентний отриманню АІМ. У випадку, коли середнє значення безперервного повідомлення  $x(t) = 0$ , отримується балансована АІМ, а якщо середнє значення  $x(t)$  дорівнює половині повної шкали зміни величини  $x$ , формується модульована послідовність імпульсів відповідної АІМ з глибиною модуляції  $m = 1$ .

### 2.1.1 Математична модель неперервного повідомлення

Складність завдання вибору інтервалу дискретизації полягає у врахуванні властивостей вихідних безперервних повідомлень, способу відновлення цих повідомлень з використанням відліків та потрібної точності відновлення.

На першому етапі вирішення цієї проблеми важливим є вибір моделі безперервного повідомлення, яка представляє собою певну математичну ідеалізацію такого повідомлення. Вдалість вибору моделі визначає простоту

теорії та можливість її практичної реалізації. З математичної точки зору безперервні реальні повідомлення повинні розглядатися як реалізації деякого нестационарного ВП.

Зручність такої ідеалізації виявляється в тому, що для розгляду багатьох аспектів теорії імпульсного перетворення можна скористатися розробленою теорією стаціонарних ВП. До того ж, багато стаціонарних процесів відзначаються властивістю ергодичності, яка дозволяє отримувати характеристики процесу на основі одного його спостереження. У випадку реальних процесів, які мають обмежену тривалість у часі, властивість ергодичності порушується, і визначення характеристик процесу на основі одного спостереження стає неточним. Однак при умові

$$T_c \Delta f \gg 1 \quad (2.8)$$

де  $T_c$  – тривалість процесу, а  $\Delta f$  – ширина його енергетичного спектра, ця неточність зменшується. Умова 2.8 представляє собою один з необхідних критеріїв для досягнення квазістаціонарності ВП.

Для аналізу характеристик стаціонарного ВП  $\{x(t)\}$ , який використовується як модель для безперервних повідомлень, необхідно мати інформацію про його функцію щільності розподілу. Дана функція здебільшого залишається невідомою, і, зазвичай, процес описують через його енергетичний спектр  $G_x(\Omega)$  або кореляційну функцію.

Енергетичний спектр ВП – це функція, яка характеризує СЩП даного процесу  $G_x(-\Omega) = G_x(\Omega)$ .

Функцію  $G_x(\Omega)$  можна виразити через спектр амплітуд тимчасового процесу. Якщо амплітудний спектр одного з виявлень ВП  $x(t)$  протягом інтервалу  $T_c$  позначається як  $A_x(\Omega)$ , то можна довести, що

$$G_x(\Omega) = \lim_{T_c \rightarrow \infty} \left( \frac{|A_x(\Omega)|^2}{T_c} \right) \quad (2.9)$$

де  $|A_x(\Omega)|$  – модуль амплітудного спектра. Для квазістаціонарних процесів обмеженої тривалості формула 2.9 стає приблизною апроксимацією, проте, за умови виконання (2.8), цим можна знехтувати.

На процес можуть впливати певні обмеження, які враховують фізичні характеристики реальних повідомлень, зокрема:

- Обмеження на кінцеве значення середньої потужності процесу.

$$P_x = \frac{1}{T_c} \int_0^T x^2(t) dt < \infty \quad (2.10)$$

Ця величина стосується стаціонарного ергодичного процесу і визначається як  $P_x = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty G_x(\Omega) d\Omega$ .

- Обмеження на скінченну шкалу миттєвих значень.

$$\max|x(t)| \leq X_m \quad (2.11)$$

Під час передачі неперервних повідомлень через КЗ завжди виникають спотворення. Це відбувається через те, що енергетичний спектр будь-якого реального повідомлення має тенденцію зменшуватися зі зростанням частоти. Починаючи з певної частоти, енергетична щільність повідомлення стає меншою за енергетичну щільність завад.

Середньоквадратична помилка, пов'язана з обмеженням енергетичного спектра стаціонарного ВП за допомогою граничної частоти  $\Omega_B$ , визначається виразом

$$\delta^2 F = \frac{\int_{\Omega_B}^\infty G_x(\Omega) d\Omega}{\int_0^\infty G_x(\Omega) d\Omega} = \frac{\Delta P_x}{P_x} = \frac{\Delta E_x}{E_x} \quad (2.12)$$

Це вираження можна інтерпретувати як відношення середньої потужності  $\Delta P_x$  чи енергії  $\Delta E_x$ , вилученої частини спектра, до загальної середньої потужності всього спектра.

Таким чином, як ідеальну модель для безперервних повідомлень, зазвичай обирають квазістаціонарний ВП  $\{x(t)\}$ , що характеризується

обмеженою тривалістю в часі та обмеженим енергетичним спектром, а також відповідає умовам (2.10) і (2.11).

Ця розглянута модель є простою та зручною для розв'язання різноманітних завдань, які виникають при дискретизації безперервних повідомлень.

### **2.1.2 Гранична дискретизація безперервних повідомлень з обмеженим спектром**

У контексті теорії дискретизації виникає значуще питання про граничний інтервал дискретизації  $\Delta t = \max \Delta t$ , при якому можна досягти відновлення безперервної функції часу з заданою точністю за допомогою її відліків. Мінімальне необхідне число відліків у цьому випадку визначається величиною  $\min m = \left\lceil \frac{T_c}{\max \Delta t} \right\rceil$ .

Гранична дискретизація, яка відповідає цій умові, забезпечує представлення неперервного повідомлення з мінімальною кількістю відліків при зазначеній точності.

На сьогоднішній день найрозвиненішою та широко використовуваною є гранична дискретизація безперервних повідомлень, яка базується на теоремі Котельникова [3, 6].

Припустимо, що відома одна з реалізацій  $x(t)$  квазістаціонарного ВП  $\{x(t)\}$ , що відповідає сукупності можливих неперервних повідомлень. Незважаючи на складність, вона є детермінованою функцією часу. З використанням перетворення Фур'є можна визначити комплексний амплітудний спектр цієї функції:

$$x(t) \Leftrightarrow A_x(j\Omega) = A_x(\Omega)e^{j\phi\Omega} = \int_0^{T_c} x(t)e^{-j\Omega t} dt \quad (2.13)$$

З огляду на необхідну точність та припустимий рівень завад, обмежимо даний спектр певною частотою  $\Omega_B = 2\pi F_B$ , введемо модель повідомлення із обмеженим амплітудним спектром. Ця модель має наступні особливості:

- Відноситься до конкретної реалізації ВП, тобто відповідає детермінованій функції.
- Містить обмежений спектр.

Для даної моделі справедлива наступна теорема: якщо безперервна функція часу  $x(t)$  має спектр, обмежений смугою частот від 0 до  $F_B$ , то ця функція цілковито визначається послідовністю своїх миттєвих значень, знятих у моменти часу, розділені інтервалами  $\Delta t = \frac{1}{2F_B}$ .

Результатом доведення теореми Котельникова є вираз:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k\Delta t) \frac{\sin \Omega_B(t-k\Delta t)}{\Omega_B(t-k\Delta t)} \quad (2.14)$$

де

$$\Delta t = \frac{1}{2F_B} = \frac{\pi}{\Omega_B} \quad (2.15)$$

У цьому виразі значення  $x(k\Delta t)$  у дискретних крапках часу можна розглядати як координати  $X_k$ , за  $\frac{\sin \Omega_B(t-k\Delta t)}{\Omega_B(t-k\Delta t)}$ .

Отже, вираз (2.14) розглядаємо як окремий випадок узагальненого ряду Фур'є:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_{k\phi k}(t) \quad (2.16)$$

Ключовий аспект важливості виразу 2.13 полягає в тому, що він пропонує рішення як прямої задачі (визначення інтервалу дискретизації  $\Delta t$ ), так і зворотної задачі (відновлення безперервної функції  $x(t)$  на основі її відліків). Згідно з формулою 2.16, процедура відновлення початкової функції редукується до додавання нескінченної кількості функцій  $\varphi_k(t)$ . Це вказує на те, що точне відновлення функції  $x(t)$  з обмеженим спектром можливе лише за

умови нескінченної тривалості цієї функції в часі. Однак у реальності всі реальні повідомлення обмежені за часовою шкалою.

Якщо обмежити спектр повідомлення на частоті  $F_B$  та визначити число відліків за тривалістю  $T_c$ , відповідно до теореми Котельникова, можна отримати кількість відліків, представлену формулою 2.17.

$$m = \frac{T_c}{\Delta t} = 2F_B T_c \quad (2.17)$$

У даному випадку ряд 2.17 складатиметься з обмеженої кількості членів, що призведе до неточності представлення безперервної функції, як показано у формулі 2.18.

$$x(t) \approx \bar{x}(t) = \sum_{k=-m/2}^{m/2} x_{k\varphi k}(t) \quad (2.18)$$

Вираження вказує на те, що при обмеженому числі членів ряду їхня сума точно відповідає миттєвим значенням функції  $x(t)$  не на всьому інтервалі часу  $T_c$ , а лише в точках відліку. У проміжках між цими точками значення функції  $x(t)$  та наближеної функції  $\bar{x}(t)$  розрізняються, що призводить до похибки. Похибку можна зменшити, збільшивши число членів ряду. З виразу 2.17 видно, що при обмеженій тривалості повідомлення  $T_c$  це можна досягти шляхом зменшення інтервалу дискретизації  $\Delta t$ , тобто збільшенням значення частоти  $F_B$ , що обмежує спектр повідомлення.

Середньоквадратична помилка спричина вказаною неточністю:

$$\delta^2 T = \frac{\int_0^{T_c} [x(t) - \bar{x}(t)]^2 dt}{\int_0^{T_c} x^2(t) dt} = \frac{\int_0^{T_c} \varepsilon^2 T(t) dt}{L_x} \quad (2.19)$$

де  $\varepsilon^2 T(t)$  – похибка між  $x(t)$  і  $\bar{x}(t)$ ;  $E_x$  – енергія безперервного повідомлення.

Загальна середньоквадратична помилка при дискретизації повідомлення обмеженої тривалості:

$$\delta^2 D = \delta^2 T + \delta^2 F > 2\delta_F = \frac{2}{E_x} \int_{\Omega_B}^{\infty} G(\Omega) d\Omega = 2\Delta E_x E_x \quad (2.20)$$

З точки зору статистичної теорії зв'язку теорема Котельникова має обмеження: вона справедлива лише для детермінованих функцій з обмеженим спектром.

### 2.1.3 Дискретизація з урахуванням реальних способів відновлення

Використання теореми Котельникова на практиці суттєво ускладнюється внаслідок певних труднощів. Це пояснюється тим, що в реальних пристроях не завжди вдається точно виконати кілька важливих умов, на яких ґрунтується ця теорема:

- Обмеженість спектра повідомлення.
- Ідеальність комутуючої послідовності  $\delta$ -функцій.

Таким чином, відповідно до теореми Котельникова, точна реалізація як дискретизації, так і відновлення неперервного повідомлення є неможливою. На практиці широко використовується метод відновлення за допомогою інтерполяційного многочлена Лагранжа [5]. Застосування простих методів інтерполяції вимагає вибору вищої частоти дискретизації, і утворена такою дискретизацією послідовність, з інформаційної точки зору, має визначену надмірність.

Оцінка величини надмірності

$$r = \frac{m_\phi - m_0}{m_\phi} = 1 - \frac{m_0}{m_\phi}, \quad 0 \leq r \leq 1, \quad (2.21)$$

де  $m_0$  – мінімально можлива,  $m_\phi$  – фактична кількість відліків, здійснених за час, обумовлений тривалістю повідомлення  $T_c$ . Частота дискретизації пов'язана з інтервалом дискретизації  $\Delta t$  та верхньою граничною частотою спектра повідомлення  $F_B$  за формулою 2.22, де  $\mu$  – коефіцієнт проходження відліків.

$$F_B = \frac{1}{\Delta t} = \mu F_B \quad (2.22)$$

Для граничної дискретизації за Котельниковим:



$$\Delta t = \max \Delta t = \frac{1}{2} F_B, m_0 = 2 F_B T_c, \mu = 2 \quad (2.23)$$

У випадку реальної дискретизації, де  $\mu > 2$ , маємо:

$$\Delta t = \Delta t_\phi = \frac{1}{\mu F_B}, m_\phi = \mu F_B T_c > m_0 \quad (2.24)$$

На практиці оцінюють надмірність відліків за допомогою величини, яку називають коефіцієнтом надмірності:

$$k_{\text{кнд}} = \frac{\max \Delta t}{\Delta t_\phi} = \frac{m_\phi}{m_0} = \frac{\mu}{2} \geq 1 \quad (2.25)$$

З урахуванням виразу 2.25, формулу 2.21 можна представити у вигляді:

$$r = 1 - \frac{2}{\mu} = 1 - \frac{2}{k_\epsilon} \quad (2.26)$$

Для уникнення значної надмірності слід обирати значення параметра  $\mu$  близьким до граничного ( $\mu \sim 2$ ). Зокрема, спроба зменшити ці труднощі призводить до необхідності вибору більших значень  $\mu$ , але це призводить до збільшення надмірності відліків.

Для повідомлень із прямокутним спектром граничний інтервал дискретизації:

– При східчастій інтерполяції:

$$\Delta t_{CT} = \frac{\sqrt{3\delta_0}}{\Omega_B} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \delta_0 \Delta t_{\text{ПР}} \approx 0.55 \delta_0 \Delta t_{\text{ПР}} \quad (2.27)$$

– При лінійній інтерполяції:

$$\Delta t_L = \frac{2\sqrt{2\sqrt{5}\delta_0}}{\Omega_B} \approx 1.35 \sqrt{\delta_0 \Delta t_{\text{ПР}}} \quad (2.28)$$

– При параболічній інтерполяції:

$$\Delta t_{\text{ПБ}} = \frac{\sqrt[3]{15.5\sqrt{7}\delta_0}}{\Omega_B} \approx \sqrt[3]{\delta_0 \Delta t_{\text{ПР}}} \quad (2.29)$$

де  $F_B$  – верхня гранична частота спектра повідомлення,  $\Delta t_{\text{ПР}} = \frac{1}{2} F_B$  – граничний інтервал дискретизації,  $\delta_0$  – допустима відносна похибка рівномірного наближення, що обумовлена виразом:

$$\delta_0 = \frac{\max|x(t) - \bar{x}(t)|}{X_m} = \frac{\Delta x_0}{x_{\max}} \quad (2.30)$$

$x(t)$  представляє вихідне неперервне повідомлення;  $\bar{x}(t)$  – повідомлення, відновлене за допомогою інтерполяції;  $X_m = X_{\max}$  – максимальне значення інтервалу зміни вихідного повідомлення.

Визначення необхідного інтервалу дискретизації, де  $k$  – порядок інтерполяції:

$$\Delta t_k \approx (\delta_0)^{\frac{1}{k+1}} \Delta t_{\text{ПР}} = \frac{1}{2F_B} (\delta_0)^{\frac{1}{k+1}} \quad (2.31)$$

Величина помилки рівномірного наближення, визначена виразом 2.30, приблизно відповідає середньоквадратичній помилці дискретизації, що обумовлена виразом 2.19:

$$\delta_0 \approx \delta_{\text{Д}} \approx \sqrt{\frac{2\Delta E_x}{E_x}} \quad (2.32)$$

Дана методика розрахунків є прийнятною тільки для повідомлень з швидко спадаючими спектрами. У випадку повідомлень із повільно спадаючими спектрами, обчислення призводять до зменшення значень інтервалів дискретизації, особливо при використанні методів інтерполяції високого порядку, другого та вищого. Для повідомлень із порівняно повільно спадаючими спектрами неефективно використовувати методи інтерполяції високого порядку, оскільки вони проявляють малу ефективність.

## 2.1.4 Дискретизація безперервних повідомлень за рівнем (квантування)

Усяке неперервне повідомлення слід уявляти як одну із реалізацій, які належать до нескінченної кількості реалізацій деякого ВП. Миттєві значення цього процесу можуть знаходитися в будь-якому межах деякого діапазону  $[X_{max}, X_{min}]$ , обумовленого фізичними обмеженнями, характерними для реальних повідомлень. Цей діапазон називається неперервною шкалою миттєвих значень повідомлень.

Розділимо неперервну шкалу миттєвих значень повідомлень на скінченну кількість квантів. Отримана дискретна шкала називається шкалою рівнів квантування, розподіл шкали – рівнями квантування, інтервал між сусідніми рівнями квантування – крок квантування. Розрізняють рівномірне квантування, коли крок квантування  $\Delta x$  є постійним по всій шкалі, і нерівномірне квантування, коли крок квантування змінюється від рівня до рівня відповідно до певного закону.

Залежно від реалізованого масштабу квантування, неперервна інформація може бути замінена квантованою інформацією, миттєвими значеннями якої може бути лише обмежена кількість дискретних значень, що визначаються рівнем квантування. Щоб проілюструвати це, на рисунку 2.2 показано частину квантової шкали (три рівні) і відповідну квантову складову. На рисунку 2.2,  $X_{KB(i-1)}$ ,  $X_{KB(i)}$ ,  $X_{KB(i+1)}$  – рівні квантування чисел  $(i-1)$ ,  $(i+1)$ ;  $\Delta x$  – крок квантування;  $\Delta \varepsilon_{KB(i)}$  – похибка квантування.

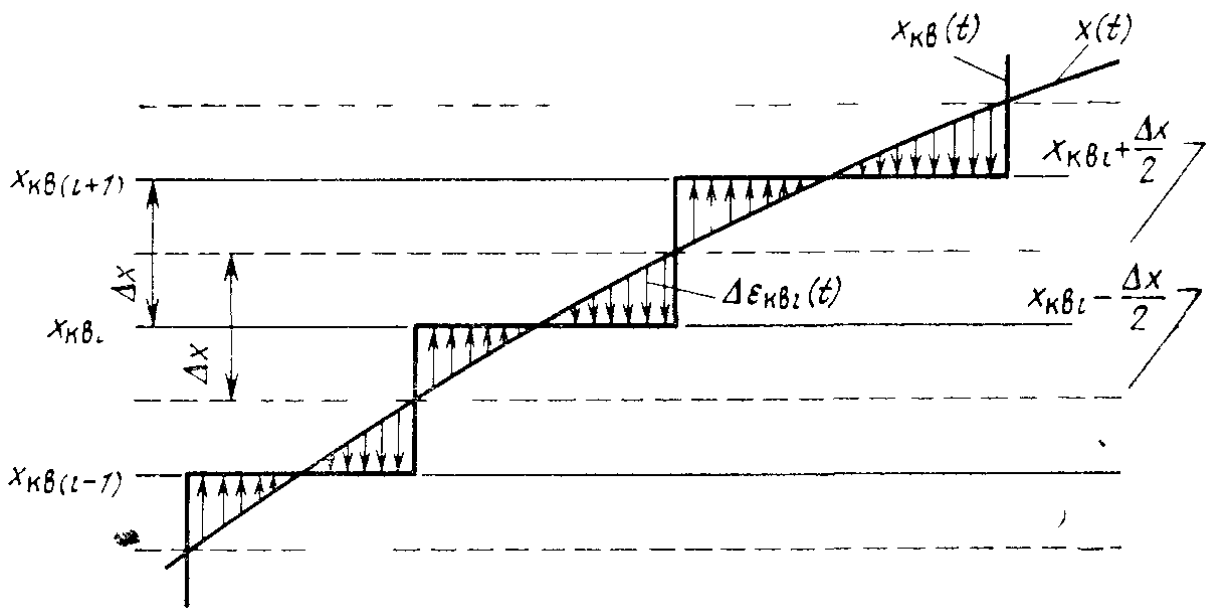


Рисунок 2.2 – Частина квантової шкали (три рівні) та квантова складова

Принцип квантування є досить простим: кожне миттєве значення повідомлення призначається найближчому рівню. Легко помітити, що за цим правилом кожен рівень квантування має бути розташований в середині зони нерозрізненості, що дорівнює кроку квантування.

Внаслідок квантування неперервне повідомлення  $x(t)$  замінюється  $x_{KB}(t)$ , яке володіє ступінчастою формою та може узяти лише обмежену кількість різних миттєвих значень, рівну кількості рівнів квантування. При такій підстановці виникає похибка, відома як похибка квантування.

$$x_{KB}(t) = x(t) + \varepsilon_{KB}(t) \quad (2.33)$$

Похибка квантування представляє ВП, яка називається шумом квантування. Вплив шуму квантування оцінюється за допомогою відносної середньоквадратичної похибки квантування, визначеної за формулою 2.34, де  $\varepsilon_{KB}^2$ ,  $x^2(t)$  представляє середні квадрати шуму квантування та квантованого повідомлення.

$$\delta_{KB} = \left[ \frac{\varepsilon_{KB}^2(t)}{x^2(t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

Припускаючи, що процеси  $\varepsilon_{\text{КВ}}(t)$  і  $x(t)$  – ергодичні, можна довести, що для рівномірного квантування

$$\delta_{\text{КВ}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{A_x}{\sqrt{x^2(t)}} \frac{1}{L_{\text{КВ}}} = \frac{k_x}{L_{\text{КВ}}} \quad (2.35)$$

Тут  $A_x$  позначає повний діапазон миттєвих значень ВП  $x(t)$ ,  $L_{\text{КВ}}$  – кількість рівнів квантування, а  $k_x$  – коефіцієнт, залежний від закону розподілу миттєвих значень ВП  $x(t)$ .

Дослідження показують, що  $k_x \in [0; 1]$ . У інженерних розрахунках часто приймається  $k_x = 1$ .

## 2.2 Граничні можливості систем передачі цифрової інформації. Вибір виду сигналів

З урахуванням ряду припущень та ідеалізацій Шеннона вдалося сформулювати кілька теорем, що стосуються оптимальних КЗ. Для гаусівського каналу з білим шумом та обмеженою середньою потужністю сигналу пропускна здатність каналу [6] визначається наступною формулою:

$$\max R = C = \Delta f_e \log_2 \left( 1 + \frac{P_C}{P_{\text{Ш}}} \right) = \Delta f_e \log_2 \left( 1 + \frac{P_C}{N_0 \Delta f_e} \right), \quad (2.36)$$

де  $C$  – пропускна здатність каналу;  $\Delta f_e$  – ширина спектра сигналу;  $P_C$  – середня потужність сигналу;  $P_{\text{Ш}}$  – середня потужність шуму в каналі;  $N_0$  – спектральна щільність білого гаусівського шуму.

Формула 2.36 характеризує максимальні можливості каналу, де використовуються оптимальні методи передачі та прийому, що забезпечують синхронізацію ефективності джерела інформації з пропускною здатністю каналу. Уся інформація, створена джерелом, повністю досягає одержувача, іншими словами, втрати інформації через перешкоди в каналі відсутні. Це свідчить про те, що між переданим та прийнятим повідомленням існує повна відповідність, а помилки відсутні.

Формула 2.36 виконується лише в умовах, які фізично нереалізовані: нескінченний час передачі інформації та сталі умови роботи каналу. Дану формулу слід розглядати як асимптотичний вираз, що визначає фізично недосяжну межу швидкості передачі інформації.

Коли застосовується неоптимальне кодування в каналах, швидкість передачі інформації стає меншою за пропускну здатність каналу:  $R < \max R = C$ , і при цьому виникає ненульова помилка при передачі інформації.

Навіть ураховуючи значущі відмінності у умовах експлуатації реальних КЗ, виключно цікаво визначити граничні можливості оптимальних каналів та встановити межі, які принципово неможливо перевершити будь-якими методами передачі та прийому.

Визначати витрати енергії та пропускну здатність для передачі одиниці інформації в ідеальному каналі за допомогою величин:

$$\beta_E = \frac{E_0}{N_0} = \frac{P_C T_0}{N_0} \quad (2.37)$$

$$\beta_E = \frac{\Delta f_E}{R_{max}} = \frac{\Delta f_E}{C} \quad (2.38)$$

де  $E_0$  і  $T_0$  – відповідно енергія сигналу та час, необхідний для передачі одиниці інформації в оптимальному каналі.

Приймаючи, згідно з визначенням,

$$\max R T_0 = C T_0 = 1 \text{ дв. од} \quad (2.39)$$

і розглядаючи формули 2.37 та 2.38, формулу 2.36 можна перетворити на

$$\frac{\Delta f_E}{C} \log_2 \left( 1 + \frac{E_0}{N_0} \frac{C}{\Delta f_E} \right) = 1 \quad (2.40)$$

$$\log_2 \left( 1 + \frac{\beta_E}{\beta_{\Delta f}} \right)^{\beta_{\Delta f}} = 1 \quad (2.41)$$

Після невеликих перетворень цей вираз можна записати як

$$\beta_E = \beta_{\Delta f} \left( 2^{\frac{1}{\beta_{\Delta f}}} - 1 \right) \quad (2.42)$$

Формула 2.42 встановлює функціональний зв'язок між відносними витратами енергії та пропускною здатністю в ідеальному гаусівському КЗ. При зростанні відносних витрат пропускної здатності, відносні витрати енергії в ідеальному каналі зменшуються, прямуючи до значення

$$\lim_{\beta_{\Delta f} \rightarrow \infty} \beta_E = \min \beta_E = \frac{1}{\log_2 e} = \ln 2 \approx 0.7 \quad (2.43)$$

Зв'язок 2.42 проілюстровано на рисунку 2.3. Ця залежність відома як границя Шеннона для ідеального гаусівського КЗ. Вона представляє геометричну лінію, на якій кожна точка відповідає параметрам оптимальної системи.

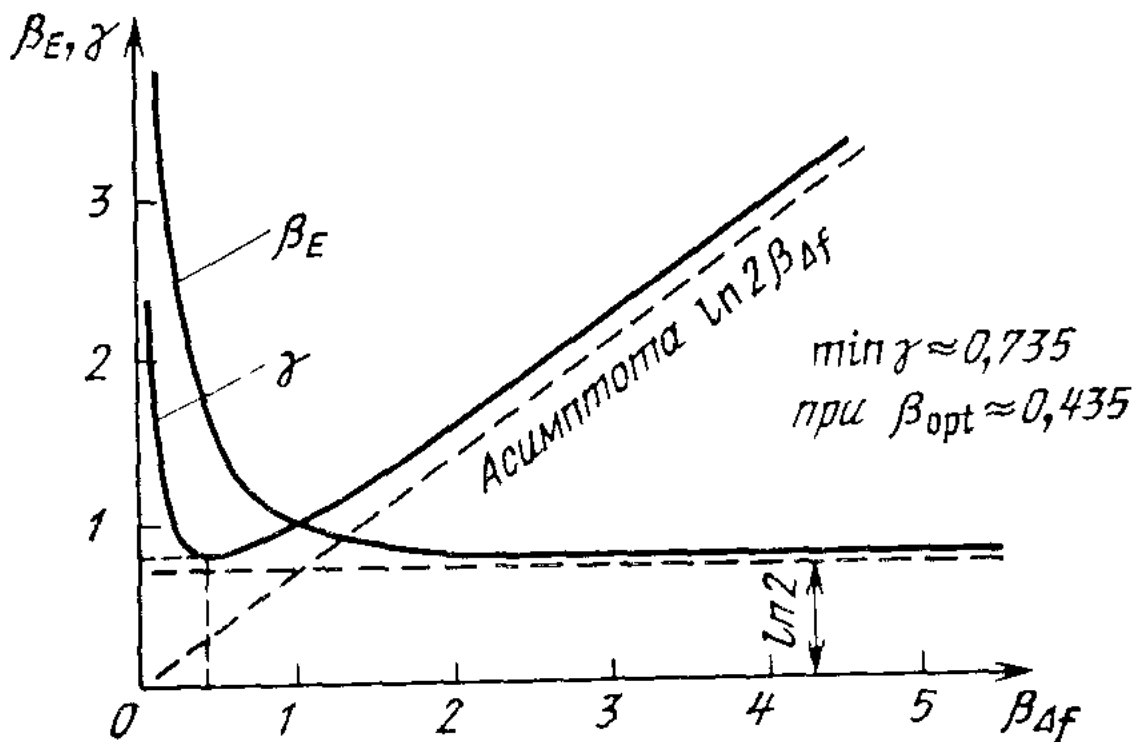


Рисунок 2.3 – Границя Шеннона гаусівського каналу зв'язку

З проведеного аналізу випливає, що згідно із теорією Шеннона існує безліч оптимальних систем, кожна з яких має свої характеристики щодо питомих витрат  $\beta_e$  та  $\beta_{\Delta f}$ .

На графіку (див. рис. 2.3) видно, що намагання покращити один із показників обов'язково призводить до погіршення іншого. Системи із низькими витратами енергії потребують значних смуг  $i$ , навпаки, системи із зниженими витратами смуги потребують великих енергетичних затрат. Оскільки реальні системи не можуть перевищувати оптимальні показники, реалізованим системам зв'язку відповідають лише ті точки на площині  $(\beta_e, \beta_{\Delta f})$ , які розташовані вище границі Шеннона.

Висновки, які можна зробити на основі теорії Шеннона, є принципово важливими, оскільки вони вказують на можливі шляхи вирішення низки ключових завдань прикладного спрямування. Серед цих завдань важливим є вибір типу сигналу. Значущість цього вибору пояснюється тим, що показники якості функціонування розробленої ІС значно залежать від правильного підбору типу сигналу, враховуючи специфіку області застосування, конкретні вимоги до ІС та обмеження, які діють на певні її характеристики та параметри. Такі умови роблять завдання вибору типу сигналу вкрай складним. Зрозуміло, що при вирішенні цього завдання доводиться застосовувати спрощення та припущення, що зумовлено тим, що знайдені сигнали є лише наближеними до оптимальних для даної ІС [6].

Максимальна середня продуктивність  $H_t$  стаціонарного джерела дискретної інформації визначається величиною

$$\max H_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \left( \log_2 \frac{M}{T} \right) \quad (2.44)$$

де  $M$  – кількість різних повідомлень тривалістю  $T$ , що генеруються дискретним джерелом.



Коли джерело із алфавітом з  $n$  символів генерує повідомлення, що складаються з  $m$  символів і мають однакову тривалість  $\tau_0$ , формулу 2.44 можна виразити наступним чином:

$$\max H_t = \lim_{m \rightarrow \infty} \left( \log_2 \frac{n^m}{m\tau_0} \right) = \log_2 \frac{n}{\tau_0} \quad (2.45)$$

Максимальна ефективність джерела дискретної інформації визначається лише основою алфавіту  $n$  та часом тривалості інформаційного символу  $\tau_0$ .

В оптимальному КЗ джерело інформації завжди синхронізоване з каналом, що означає, що його ефективність дорівнює пропускну здатності каналу:

$$\max H_t = \max R = C \quad (2.46)$$

Питомі витрати смуги в ідеальному КЗ:

$$B_{\Delta f} = \frac{\Delta f_e}{\max R} = \Delta f_e T_0 = \frac{\Delta f_e \tau_0}{\log_2 n} = \frac{B_C}{\log_2 n} \quad (2.47)$$

Величину

$$B_C = \Delta f_0 \tau_0 \quad (2.48)$$

часто називають шириною базового сигналу, яка визначає співвідношення між шириною спектра використовуваного сигналу та тривалістю інформаційного символу. Мінімальне значення даної величини приблизно рівне одиниці [4].

Вище розглянуто певні аспекти вибору типу сигналу в ідеальних КЗ для двох сценаріїв:

- Коли необхідно досягти ефективності використання смуги.
- Коли важливо забезпечити економію енергії під час передачі інформації.

Розглянемо дану проблему у контексті ідеального КЗ. Для охоплення обох аспектів витрат введемо узагальнений показник ефективності:

$$\gamma_{E,\Delta f} = \beta_{\Delta f}, \beta_E \quad (2.49)$$

Для ідеальної системи даний показник набуває вигляду:

$$\gamma_{E,\Delta f} = \beta_{\Delta f}^2 \left( 2^{\frac{1}{\beta_{\Delta f}}} - 1 \right) \quad (2.50)$$

На рисунку 2.3 наведений графік залежності узагальнених витрат від величини  $\beta_{\Delta f}$ . Він представляє геометричне місце точок, де координати кожної точки відповідають показникам ідеальної системи.

Крива розділяє усю площину  $\gamma_E, \Delta f, \beta_{\Delta f}$  на дві секції. Усі точки, розташовані вище кривої, відносяться до систем, які можна впровадити. З аналізу графіка випливає, що при певному значенні  $\beta_{\Delta f}$  узагальнені витрати в оптимальній системі досягають мінімуму. Розрахунки свідчать, що  $\min \gamma_E, \Delta f \approx 0.755, \beta_{\Delta f} \approx 0.435$ .

У діапазоні  $\beta_{\Delta f} \approx 0.35 - 0.5$  значення узагальнених витрат мало відрізняється від мінімального значення.

Проведений аналіз можливих дискретних сигналів у ідеальних КЗ може служити ефективним орієнтиром при розв'язанні практичних задач щодо вибору найбільш оптимального класу сигналів за визначеними вимогами. Далі, оптимізація ІС може бути зведена до вибору конкретного типу сигналів у межах найбільш оптимального класу.

Важливо відзначити, що показники ефективності найкращих сучасних цифрових систем зв'язку значно гірші за показники оптимальних систем, особливо щодо питомих витрат енергії. У цьому контексті важливо зазначити, що в ідеальних системах інформація передається без помилок, в той час як в реальних системах це відбувається з певною ймовірністю помилки.

### 2.3 Завадостійке кодування

Кодування аналогових повідомлень після попередньої їх дискретизації має відбуватися відповідно до теореми Котельникова: якщо спектр функції  $f(t)$

не містить частот вище  $F_B$ , то цю функцію можна повністю відновити за сукупністю її значень, визначених в моменти часу  $t_k$ , розташовані на відстані  $\frac{1}{2F_B}$ . Для передачі аналогового сигналу виконується його дискретизація з частотою відліків  $2F_B$ , і подальше застосування ІКМ до послідовності відліків. Кількість інформації в повідомленні визначається формулою:

$$I = -\log_2 P, \quad (2.51)$$

де  $P$  – ймовірність появи повідомлення. Одиницею виміру інформаційної кількості є біт двійкового коду, визначений рівною ймовірністю появи 1 або 0. У той же час, один розряд десяткового коду містить  $I = -\log_2 P = 3.32$  одиниць інформації (за умови рівної ймовірності появи десяткових символів, тобто при  $P = 0,1$  ).

Отримана інформація від пристроїв для збору КС представлена у вигляді дискретних даних у форматі уніполярного чи біполярного коду NRZ. У випадку передачі NRZ на великі відстані можуть виникати проблеми, такі як блокування постійної складової, порушення синхронізації при передачі довгих послідовностей 0 чи 1 та відсутність контролю помилок на рівні фізичного каналу. Ці труднощі вирішуються за допомогою лінійного кодування, яке вимагає максимально вузького енергетичного спектру, структури, яка дозволяє виділяти тактову частоту, і постійного контролю за помилками на рівні фізичної лінії, при цьому забезпечуючи просту технічну реалізацію.

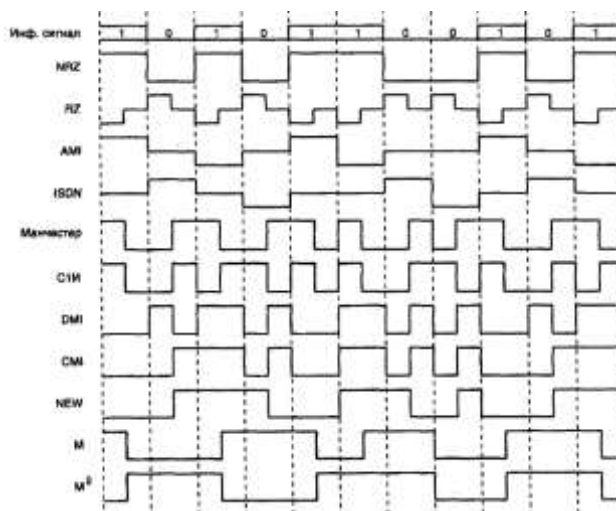


Рисунок 2.4 – Застосування лінійних кодів

Популярні двійкові лінійні коди класу 1 В2В, такі як Манчестер, DMI, CMI, NEW, код Міллера, використовують подвоєння швидкості передачі та відрізняються високою стійкістю до перешкод, простотою трансформації та можливістю виокремлення тактової частоти. Графіки енергетичних спектрів цих кодів на рисунку 2.5 надають уявлення про їх частотну ефективність [8].

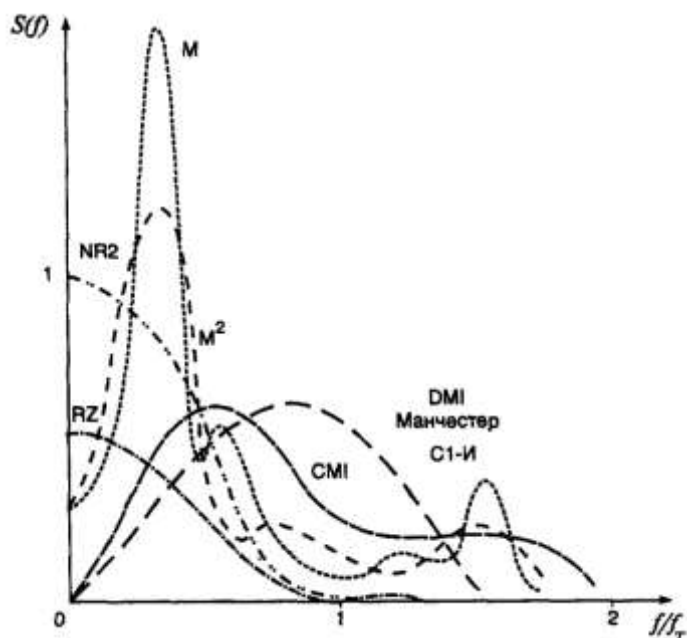


Рисунок 2.5 – Спектральні характеристики енергетики лінійних сигналів

### 2.3.1 Манчестерське кодування

Для кодування інформації найбільш поширені стали коди, які автоматично синхронізуються [8, 12, 19], тому що вони усувають потребу в додатковому каналі для передачі синхроімпульсів між вузлами мережі. На рисунку 2.6 подано код Манчестера. Автосинхронізація досягається завдяки генерації синхроімпульсів з перепадів, притаманних кожному такту коду.

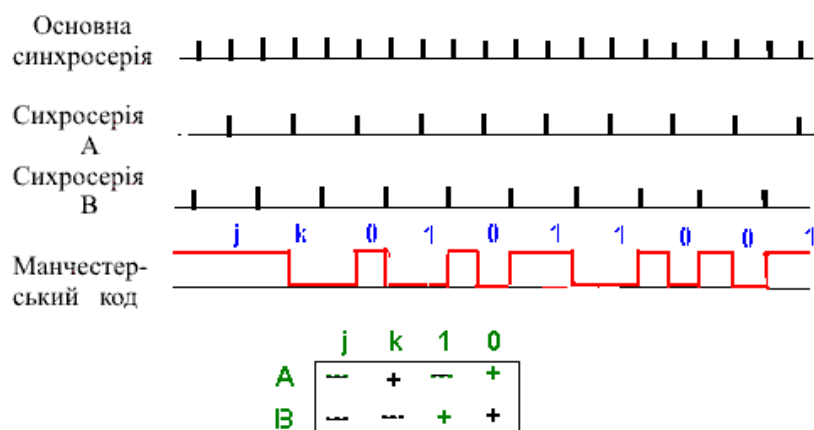


Рисунок 2.6 – Манчестерське кодування

На рисунку 2.6 наведений варіант коду Манчестера, що використовується в байт-байт-орієнтованому кодуванні. Кожен байт, складений з 1 і 0, оточується символами  $j$  і  $k$ . Передача розпочинається послідовністю сигналів  $jkjkjk \dots$ , щоб досягти синхронізації з приймальною станцією. Після цього байти повідомлення передаються без обрамлення  $j$  і  $k$ .

Код Манчестера встановлюється чіткою узгодженістю чергування імпульсів тактового інтервалу. “1” передається нульовим імпульсом у першій половині інтервалу, а “0” – зворотнім чергуванням імпульсів. Символам “1” відповідають імпульси 1-0 або 0-1, а “0” – інвертовані імпульси 1-0 або 0-1, розв’язуючи проблему фазової невизначеності на приймальній стороні.

### 2.3.2 Способи контролю правильності передачі даних. Код Хемінга

Симплексні КЗ використовують коригувальні коди для виправлення помилок, тоді як у дуплексних каналах використовуються коди для виявлення помилок, що призводить до повторної передачі від джерела. Ці методи широко використовуються в інформаційних мережах, і для ефективного виявлення помилок застосовують надійні циклічні коди, такі, як код Хемінга, оскільки прості методи, такі як контрольне підсумовування та перевірка на непарність, не є достатньо надійними, особливо при наявності пачок помилок.

У системі кодування Хемінга визначається кодова відстань  $d$ , яка вказує на відстань між двома кодами, виміряну кількістю розрядів з відмінними значеннями. Можливості виправлення помилок пов'язані з мінімальною кодовою відстанню ( $d_{min}$ ), при цьому помилки кратності  $r = \left\{ \frac{d_{min}-1}{2} \right\}$  виправляються, а помилки кратності  $d_{min} - 1$  виявляються. У коді Хемінга  $d_{min} = 3$ . Окрім інформаційних розрядів, вводиться  $L = \log_2 K$  додаткових контролюючих розрядів, де  $K$  – кількість інформаційних розрядів.  $L$  округляється до найближчого більшого цілого значення.  $L$ -розрядний контролюючий код є інвертованим результатом порозрядного додавання номерів тих інформаційних розрядів, значення яких рівні 1.

Приклад 1: Основний код 100110 має додатковий код 000 після порозрядного додавання та інвертування. При передачі основного коду також відсилається його додатковий код. При прийомі порівнюється розрахований та переданий додаткові коди. Якщо різниця не нуль, визначається номер помилкового розряду основного коду. Наприклад, при прийомі коду 100010 виявляється помилка у 3-му розряді.

## 2.4 Визначення необхідної швидкості передачі даних

Згідно [1, 2], рекомендована частота дискретизації КС – 500 Гц, з числом розрядів не менше 10 (оптимально – 12). Щоб передавати ці сигнали в реальному часі, потрібна швидкість передачі даних 6 Кбіт/с. У випадку пакетної передачі даних швидкість  $v_{\text{п}}$  визначається формулою  $v_{\text{п}} = K \cdot f_g \cdot N$ , де  $K$  – поправочний коефіцієнт (зазвичай для пакетної передачі  $K = 1,5$ ),  $f_g$  – частота дискретизації, а  $N$  – кількість розрядів. Застосовуючи цю формулу, отримуємо  $v_{\text{п}} = 1,5 \cdot 500 \cdot 1,2 = 9000$  біт/с. Таким чином, для пакетної передачі даних потрібна швидкість 9 Кбіт/с.

## РОЗДІЛ 3. НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 3.1 Принципи побудови мереж

#### 3.1.1 Локалізація трафіка й ізоляція мереж

Трафік у мережі має випадковий характер, але виявляє певну закономірність. Зазвичай користувачі, які співпрацюють над спільними завданнями, часто взаємодіють один з одним або з загальним сервером. Іноді вони також можуть звертатися до ресурсів ПК інших груп. Оптимально, щоб структура мережі відповідала організації інформаційних потоків, і ПК можуть бути об'єднані в групи відповідно до характеру їхнього мережевого трафіку.

Мости та комутатори застосовуються для поділу мережі на сегменти та екранування локального трафіку всередині сегменту. Вони не пересилають кадри за межі сегменту, за винятком тих, що призначені ПК в інших сегментах. Це призводить до формування ізольованих підмереж, що дозволяє ефективно використовувати пропускну здатність ліній зв'язку, враховуючи внутрішній трафік кожної групи та обмін даними між ними.

Локалізація трафіку за допомогою мостів і комутаторів має свої обмеження. Логічні сегменти мережі між мостами недостатньо ізольовані і не захищені від широкомовних штормів. Захист від широкомовних штормів із використанням мостів досягається обмеженням кількості генерованих широкомовних пакетів для окремого вузла.

Застосування віртуальних секцій в LAN гарантує повну ізоляцію трафіку між ними. ПК в різних віртуальних сегментах не взаємодіють при передачі кадрів загального доступу, що дозволяє створити внутрішні мережі в більших мережах, що базуються на комутаторах та мостах.

Недоліки, що виникають у мостів та комутаторів з їхньою неспроможністю чітко визначати частини мережі, ускладнюють структурування великих мереж.;



### **3.1.2 Узгодження протоколів каналного рівня**

Створення мереж із різними технологіями може бути здійснене за допомогою різних типів комутаторів та мостів на каналному рівні. Проте не всі з них можуть транслювати протоколи цього рівня, і їхні можливості обмежені. У поєднаних мережах важливо узгоджувати максимальні розміри полів даних у кадрах, оскільки каналні протоколи не підтримують фрагментацію пакетів.

### **3.1.3 Маршрутизація в мережах з довільною топологією**

Протоколи каналного рівня здатні передавати дані або між сусідніми вузлами, або між будь-якими вузлами, за умови простої топології мережі, такої як деревоподібна.

При об'єднанні секцій за допомогою комутаторів, виникають труднощі через обмеження топології мережі, зокрема, необхідність уникнення петель. Мости та комутатори ефективно працюють при єдиному шляху між відправником і отримувачем, але додаткові зв'язки і петлі можуть оптимізувати завантаження та забезпечити альтернативний маршрут для підвищення надійності мережі.

На рівні з'єднання відбувається передача даних між взаємопов'язаними вузлами. Для створення складеної структури мережі використовується мережевий рівень, який включає маршрутизатор для об'єднання мереж. У складних мережах існує кілька альтернативних шляхів, і вибір оптимального маршруту залежить від часу пропуску та інших критеріїв, визначених маршрутизаторами та кінцевими вузлами. Маршрут представляє собою послідовність маршрутизаторів, яку пакет повинен пройти від передавача до отримувача, і визначається маршрутизаторами, враховуючи інформацію про мережу та використовуючи критерії вибору шляху, основані, зазвичай, на часі пропуску.

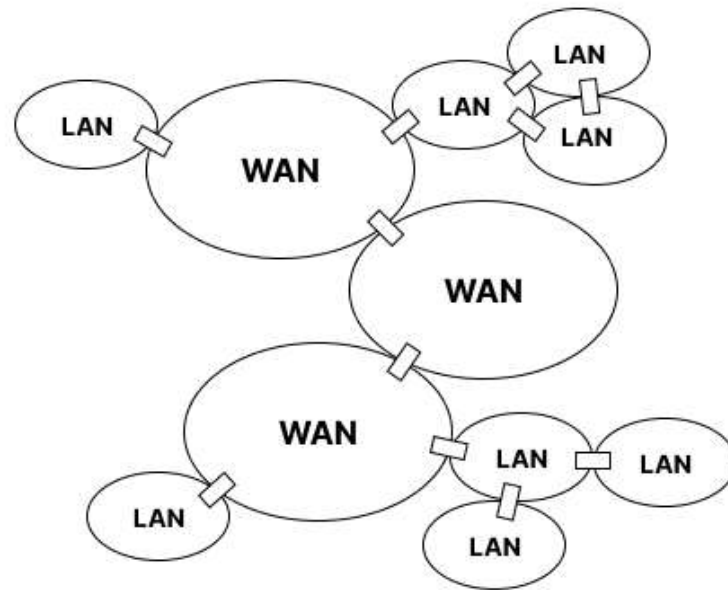


Рисунок 3.1 – Архітектура спроектованої мережі

### 3.1.4 Мережний рівень і модель OSI

У моделі OSI мережні засоби розділені на сім рівнів, кожен із них виконує визначені функції. Мережний рівень служить як проміжний ланцюг, обслуговуючи протоколи на вищих рівнях і взаємодіючи з рівнями каналу та фізичного. Фізичний рівень передає біти через різні фізичні канали, визначаючи характеристики передачі та параметри сигналів. Канальний рівень створює зв'язок між вузлами, встановлюючи структуру зв'язків і адресацію. Мережний рівень забезпечує доставку даних між вузлами без гарантій щодо надійності передачі. Транспортний рівень відповідає за передачу даних з визначеною надійністю, включаючи керування з'єднаннями та упорядкування пакетів.

Сеансовий рівень веде діалог та забезпечує синхронізацію обміну повідомленнями. Рівень подання відповідає за зовнішнє представлення даних, включаючи компресію, декомпресію, шифрування та дешифрування. Прикладний рівень надає мережні сервіси для кінцевих користувачів та додатків, таких як електронна пошта та передача файлів. Розробка транспортної підсистеми акцентується на функціях фізичного, каналного і мережного рівнів,

пов'язаних із мережевою апаратурою. Функції прикладного, сеансового та рівня подання виконуються на рівні ОС та системних додатках кінцевих вузлів, і транспортний рівень діє як посередник між цими групами протоколів.

### **3.1.5 Функції мережного рівня**

Протоколи канального рівня неадекватні для розширення складних мереж, таких як об'єднання підприємств чи високонадійні системи. Введення мережного рівня дозволяє зберігати технологічні стандарти для поєднаних мереж та додає до кадрів канального рівня інформаційний заголовок мережного рівня. Цей заголовок ідентифікує адресата в будь-якій мережі, незалежно від технології. Заголовок має включати адресу призначення та інші параметри для успішної передачі пакета між різними типами мереж, включаючи номер фрагмента, інформацію про час життя пакета, стан зв'язків та інші критерії. У складених мережах використовуються числові пари для адрес відправника та одержувача, що дозволяє точно визначити межі мереж та вибирати оптимальні маршрути в будь-якій топології.

### **3.1.6 Протоколи передачі даних і протоколи обміну маршрутною інформацією**

Маршрутизатори обмінюються маршрутною інформацією через протоколи, спеціально призначені для цієї мети. Ці протоколи передають конфігураційні дані на мережному рівні, відрізняючись від протоколів мережного рівня, які несуть користувацькі дані. Протоколи маршрутизації функціонально вирішують завдання доставки кадрів через складені мережі та визначають оптимальні маршрути для пакетів. Протоколи дозволу адрес (ARP) взаємодіють з адресами на мережному рівні, відображаючи їх у локальні адреси мережі. Хоча іноді їх класифікують як протоколи канального рівня, це не впливає на їхню сутність.

## 3.2 Стек протоколів TCP/IP

### 3.2.1 Історія й перспективи стека TCP/IP

TCP/IP - це визнаний стандарт протокольного стеку для WAN. Стандарти цього протоколу представлені через RFC, що детально описують функції Інтернету. Виникнення стеку було ініційовано Міністерством оборони США для об'єднання мереж, а університет Берклі вніс вагомий внесок у його розвиток, інтегруючи його в ОС UNIX. Ініціативи IETF спрямовані на вдосконалення стандартів стеку через RFC. Хоча початково використовувався в мережах UNIX, впровадження в ОС для ПК розширює його поширення. Роль стеку TCP/IP визначається його повнотою, широким застосуванням у великих мережах, ключовою роллю в Інтернеті, використанням у корпоративних мережах і підтримкою всіма сучасними операційними системами.

### 3.2.2 Структура стека TCP/IP. Коротка характеристика протоколів

Стек TCP/IP, створений до введення моделі OSI, відрізняється від неї тим, що має 4 рівні (див. рис. 3.4).

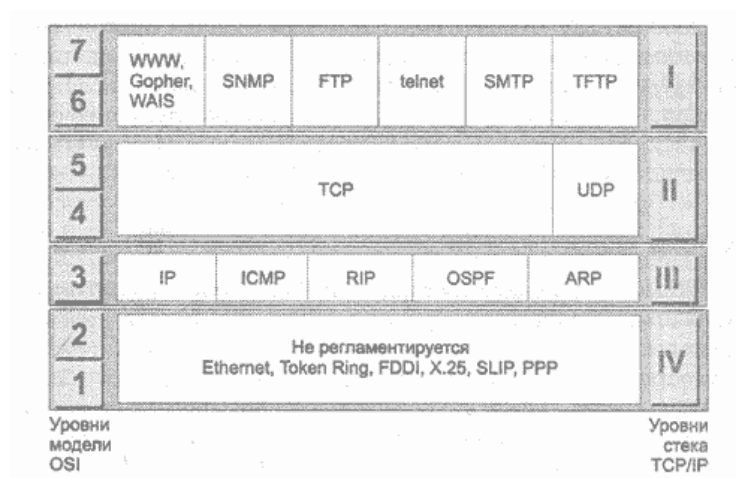


Рисунок 3.2 – Стек TCP/IP

Найнижчий рівень (рівень IV) відповідає фізичному та каналному рівням OSI, підтримуючи їх стандарти для LAN і WAN. Рівень III управляє міжмережевою взаємодією, використовуючи протокол IP, а рівень міжмережевої взаємодії використовує RIP, OSPF і ICMP. Рівень передачі даних включає TCP та UDP для надійної передачі та дейтаграмного обміну. Верхній рівень I містить протоколи, такі як FTP, telnet і SNMP, які надають різноманітні послуги у мережі.

### **3.3 Адресація в IP-мережах**

#### **3.3.1 Типи адрес: фізичний (MAC-адреса), мережний (IP-адреса) і символічний (DNS-ім'я)**

У мережі TCP/IP кожен ПК має три рівні адресування: локальну адресу вузла, яка включає унікальний MAC-адрес мережного адаптера; IP-адресу, що складається з номера мережі і номера вузла; і символічний ідентифікатор-ім'я, яке використовується на прикладному рівні, наприклад, у протоколах FTP чи telnet.

#### **3.3.2 Три основних класи IP-адрес**

IP-адреса, що складається з 4 байтів, представляється як чотири числа у десятковій та двійковій формі. Структура IP-адреси показана на рисунку 3.3. Адреси поділяються на класи A, B, C, D і E залежно від їхніх перших бітів. Кожен клас визначає розподіл байтів між мережею і вузлом. Рисунок 3.4 відображає діапазони мереж для кожного класу.



Рисунок 3.3 – Структура IP-адреси

Клас	Найменша адреса	Найбільша адреса
A	1.0.0.0	126.0.0.0
B	128.0.0.0	191.255.0.0
C	192.0.1.0.	223.255.255.0
D	224.0.0.0	239.255.255.255
E	240.0.0.0	247.255.255.255

Рисунок 3.4 – Діапазони номерів мереж кожного класу

### 3.3.3 Відображення фізичних адрес на IP-адреси: протоколи ARP й RARP

Протокол IP призначає адресу вузла (ПК чи порту маршрутизатора) адміністратором мережі, що не пов'язана з його локальною адресою, у відміну від протоколу IPX. Це полегшує використання у великих мережах, оскільки не вимагає врахування змін у глобальній адресі при зміні мережного адаптера. Локальна адреса використовується тільки в межах LAN при обміні даними між маршрутизатором та вузлом цієї мережі. Протокол ARP використовується для визначення локальної адреси по IP-адресі шляхом широкомовного пошуку в LAN.

ARP-запити та відповіді мають однаковий формат пакета, але формат пакета протоколу ARP залежить від типу мережі. У WAN автоматизація роботи протоколу ARP стає актуальною, адміністраторам зручно вести ARP-таблицю через централізований маршрутизатор, який автоматично вирішує завдання встановлення відповідності між IP-адресами та локальними адресами.

### **3.3.4 Відображення символічних адрес на IP-адреси: служба DNS**

DNS – це розподілена система із ієрархічною структурою БД для ідентифікації вузлів в Інтернеті. Основне завдання DNS – автоматичний пошук IP-адрес за відомими символічними іменами вузлів. Протокол DNS, описаний в RFC 1034 та 1035, передбачає статичну конфігурацію таблиць, що відображають імена ПК у відповідні IP-адреси.

DNS функціонує як службовий протокол і включає DNS-сервери та DNS-клієнти. Сервери зберігають частину розподіленої БД, а клієнти звертаються до серверів для отримання IP-адрес за символічними іменами.

Структура БД DNS утворює дерево, де кожен домен ідентифікує своє місце в ієрархії. Корінь БД DNS керується Internet Network Information Center, а домени верхнього рівня призначаються за країнами та організаційними принципами.

Імена доменів можуть бути довжиною до 63 символів, але кожен хост в Інтернеті ідентифікується своїм повним доменним ім'ям (FQDN), що включає імена всіх доменів від хоста до кореня.

### **3.3.5 Автоматизація процесу призначення IP-адрес вузлам мережі – протокол DHCP**

DHCP спрощує конфігурацію мережі, дозволяючи динамічне призначення IP-адрес. Це вирішує проблему складності ручного призначення

адрес, яку можуть мати користувачі. DHCP підтримує ручне, автоматичне статичне та динамічне призначення адрес.

Ручне призначення включає надання сервером відомостей про відповідність IP-адрес фізичним адресам клієнтів. Автоматичний статичний метод дозволяє DHCP-серверу призначати IP-адреси з пула без втручання оператора. Динамічний розподіл дозволяє серверу виділяти адреси клієнтам на обмежений час.

DHCP контролює конфігурацію TCP/IP та уникає конфліктів адрес. Адміністратор визначає тривалість оренди, контролюючи, як довго ПК може використовувати адресу перед оновленням.

Протокол DHCP використовує клієнт-серверну модель. ПК-клієнт висилає discover-повідомлення, яке отримують всі DHCP-сервери. Клієнт обирає пропозицію та отримує підтвердження від сервера. Незважаючи на спрощення конфігурації, DHCP може призводити до проблем, таких як несумісність інформації між DHCP і DNS, нестабільність IP-адрес та зменшення надійності при відмові сервера.

### **3.4 Протокол міжмережевої взаємодії IP**

Структура транспортних засобів у стеці протоколів TCP/IP базується на IP, який виконує ключові функції, такі як єдинообразний транспорт адресної інформації між мережами та збір та розбір пакетів при їх переміщенні між мережами з різною максимальною довжиною пакета.

#### **3.4.1 Формат пакета IP**

Пакет IP включає ключові аспекти, такі як номер версії, довжина заголовка, тип сервісу, загальна довжина, ідентифікатор пакета, прапори, зсув



фрагмента, час життя, ідентифікатор протоколу верхнього рівня, контрольна сума, адреса джерела, адреса призначення та резерв для налаштувань мережі.

### **3.4.2 Керування фрагментацією**

Протоколи транспортного рівня (TCP або UDP), які використовують мережний рівень для передачі пакетів, мають максимальний розмір поля даних IP-пакета, рівний 65535. У рівні IP проводиться фрагментація повідомлень, що перевищують цей розмір, на менші пакети з відповідними службовими полями для подальшої збірки фрагментів.

Мережі визначають максимальний розмір поля даних кадру або пакета, відомий як MTU. Наприклад, для мереж Ethernet MTU становить 1500 байт, для FDDI – 4096 байт, і для мереж X.25 – 128 байт.

Протокол IP розбиває повідомлення, що перевищують MTU, на фрагменти з встановленням відповідних прапорів фрагментації та унікальних ідентифікаторів. Фрагменти не об'єднуються маршрутизаторами IP, і призначений ПК використовує ідентифікатори для правильної збірки фрагментованого повідомлення. При втраті фрагментів, отриманих в неправильному порядку, ПК відправляє повідомлення про помилку за допомогою протоколу ICMP.

### **3.4.3 Маршрутизація за допомогою IP-адрес**

Мережеві пристрої, включаючи ПК та маршрутизатори, взаємодіють за принципами вибору маршруту у системі IP. Кожен пристрій, враховуючи таблиці маршрутизації, визначає, до якого маршрутизатора відправити пакет (див. рис. 3.5). У системі TCP/IP використовується однокроковий підхід, де кожен маршрутизатор визначає наступний крок для передачі пакета. Вибір базується на відстані до мережі призначення, де "відстань" - це метрика, яка визначає якість маршруту. ПК та маршрутизатори користуються таблицями

маршрутизації уніфікованого формату, де визначають, куди направити пакет. Маршрутизатори можуть використовувати маршрути за замовчуванням для пакетів без відомого маршруту, спрощуючи таблиці. ПК отримують інформацію про маршрут до конкретної мережі від маршрутизатора через протокол ICMP. Таблиці маршрутизації можуть містити записи для вузлів та адрес мереж, підключених безпосередньо до маршрутизатора. Маршрутизатори автоматично створюють таблиці шляхом обміну інформацією. Різні алгоритми можуть використовуватися для створення таблиць, проте формат єдиний для взаємодії між пристроями в одній мережі.

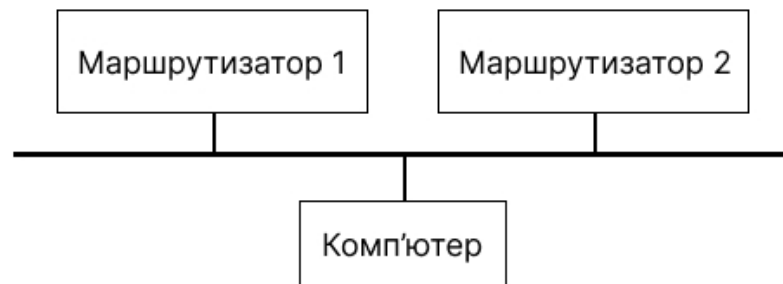


Рисунок 3.5 – Вибір маршрутизатора кінцевим вузлом

#### 3.4.4 Фіксована маршрутизація

Цей метод призначений для мереж з простою топологією і ґрунтується на вручну створених таблицях маршрутизації, які адміністратор мережі складає самостійно. Він ефективний у великих мережах, де магістраль має просту структуру з зрозумілими оптимальними шляхами для пакетів у підмережі, приєднаній до магістралі.

Таблиці маршрутизації можуть бути одномаршрутними, де для кожного адресата визначений один шлях, або багатомаршрутними, де визначено кілька альтернативних шляхів для кожного адресата. При використанні

багатомаршрутних таблиць потрібно визначити правило вибору одного із них, зазвичай один шлях є основним, а інші – резервними.

### **3.4.5 Проста маршрутизація**

Існують три типи алгоритмів простої маршрутизації:

- Випадкова маршрутизація: Пакети випадковим чином відсилаються у всі напрямки, за винятком вихідного.
- Лавинна маршрутизація: Пакети відсилаються у всі напрямки, крім вихідного.
- Маршрутизація за попереднім досвідом: Таблиці маршрутів формуються на основі інформації з минулих пакетів, які пройшли через маршрутизатор. Наприклад, цей метод використовується в прозорих мостах для збору інформації про адреси вузлів у сегментах мережі, проявляючи повільну адаптивність до змін топології мережі.

### **3.4.6 Адаптивна маршрутизація**

Адаптивна маршрутизація – це основний тип алгоритмів маршрутизації у сучасних складних мережах. Цей підхід базується на регулярному обміні маршрутизаторами спеціальною топологічною інформацією про мережі в інтермережі та їх зв'язки, враховуючи топологію, пропускну здатність і стан зв'язків. Адаптивні протоколи дозволяють маршрутизаторам враховувати оперативні зміни конфігурації зв'язків, розподіляючи цю роботу між усіма маршрутизаторами.

### **3.4.7 Приклад взаємодії вузлів з використанням протоколу IP**

Розглянемо взаємодію ПК у мережі через маршрутизатори (рис. 3.6). Наприклад, користувач ПК `cit.dol.com` в мережі Ethernet (IP-адреса 194.87.23.0) бажає взаємодіяти з ПК `s1.msk.su` в мережі Ethernet (IP-адреса 142.06.0.0).

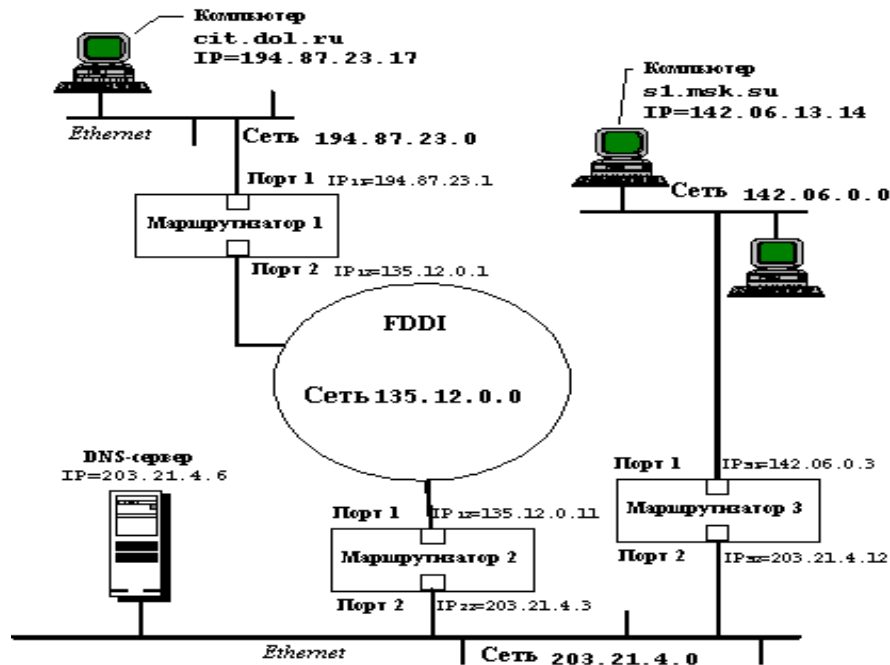


Рисунок 3.6 – Приклад взаємодії ПК через інтермережу

Користуючись командою `"ftp s1.msk.su"`, стек TCP/IP визначає IP-адресу за символьним ім'ям через таблицю HOSTS. IP-пакети для адреси 142.06.13.14 маршрутизуються до маршрутизатора за замовчуванням 194.87.23.1. ПК `cit.dol.com` формує кадр Ethernet та відправляє його маршрутизатору. Маршрутизатори поетапно маршрутизують пакет до мережі призначення, що забезпечує взаємодію ПК.

### 3.4.8 Структуризація мереж IP за допомогою масок

Адміністратори часто стикаються із проблемою обмеженої кількості централізовано виділених мережесих номерів. Рішення включає отримання додаткових номерів від NIC або використання масок для поділу однієї мережі на декілька. Маска, числове значення з одиницями в розрядах, визначає номер

мережі. Маски для класів мереж (А, В, С) регламентуються значеннями 255.0.0.0, 255.255.0.0 та 255.255.255.0. Використання масок не обмежено кратністю 8, що дозволяє ефективно розподіляти адреси на байти. Змінюючи маску, можна збільшити кількість централізовано заданих номерів мережі, що застосовується для розділення мереж і створення підмереж для ізоляції взаємодіючих станцій. Застосування масок вимагає конфігурації маршрутизаторів та ПК.

### **3.5 Протокол доставки користувачьких дейтаграм UDP**

UDP – протокол транспортного рівня, призначений для негарантованої передачі даних між прикладними процесами, із можливістю втрат, дублювання або порушення порядку пакетів.

#### **3.5.1 Зарезервовані й доступні порти UDP**

Мережний рівень забезпечує передачу даних між вузлами, в той час як транспортний рівень відповідає за передачу даних між прикладними процесами на різних вузлах мережі. Для направлення даних конкретному процесу-одержувачу використовуються порти, які служать ідентифікаторами прикладного сервісу і можуть бути призначені централізовано або локально в залежності від популярності сервісу.

#### **3.5.2 Загальна характеристика протоколу ICMP**

Протокол обміну керуючими повідомленнями ICMP дозволяє маршрутизатору інформувати кінцевий вузол про помилки при передачі IP-пакетів. Важливо зауважити, що керуючі повідомлення ICMP не можуть бути відправлені проміжному маршрутизатору, що брав участь у передачі пакета, через відсутність адресної інформації для такої відправки. Протокол ICMP

акцентує увагу на повідомленні про помилки, не конкретизуючи заходів для їх виправлення.

### **3.5.3 Луна-протокол**

Протокол ICMP використовується для перевірки доступності вузлів у мережі шляхом обміну луна-запитами та луна-відповідями. Утиліта ping в ОС використовує ці принципи для створення статистики про доступність вузлів та реакцію мережі на запити.

### **3.5.4 Повідомлення про недосяжність вузла призначення**

Якщо маршрутизатор не може передати IP-пакет, він надсилає ICMP-повідомлення "Вузол призначення недосяжний" (тип повідомлення – 3) вузлу-відправнику. Це повідомлення включає код причини, інформацію про заголовок непереданого пакета та його перші 64 біти даних. Причини можуть включати тимчасову непрацездатність обладнання, невірну адресу вузла, відсутність маршруту до мережі призначення, недосяжність протоколу чи порту, або помилку фрагментації.

### **3.5.5 Перенапрямок маршруту**

Маршрутні таблиці в ПК є статичними, а в маршрутизаторах їх оновлюють динамічно через протоколи обміну маршрутною інформацією. Маршрутизатор може коригувати таблиці ПК, використовуючи повідомлення "Перенапрямок маршруту" протоколу ICMP, щоб вказати оптимальний маршрут до призначеної мережі.

### **3.5.6 Дистанційно-векторний протокол RIP**

Протокол обміну маршрутною інформацією RIP є важливим у мережах і використовує вектори відстаней, базуючись на алгоритмі Беллмана-Форда. За допомогою "векторів відстаней" маршрутизатори обмінюються інформацією

про мережі та їхні відстані. Недоліками цього протоколу є неоптимальність рішень і збільшення трафіку при періодичному обміні широкомовними пакетами.

### **3.6 Протокол надійної доставки повідомлень TCP**

В рамках протоколів TCP/IP, TCP виконує аналогічні функції протоколу UDP на рівні транспорту, забезпечуючи надійну передачу даних між прикладними процесами через встановлення логічного з'єднання.

#### **3.6.1 Сегменти TCP**

Одиницею даних у протоколі TCP є сегмент. TCP розглядає надходження інформації як неструктурований потік байт від вищих рівнів, буферизує його та вирізає частину для передачі як сегмент на мережевий рівень.

Якщо додаток вимагає термінову передачу даних (з бітом PSH, що встановлений в 1), TCP негайно відправляє ці дані в мережу "поза потоком" (out of band), навіть якщо буфер не заповнений.

Розмір сегментів у з'єднанні може відрізнятися, проте обидва кінці з'єднання повинні узгодити максимальний розмір сегмента, щоб уникнути фрагментації. Розмір сегмента обирається так, щоб повністю вміщуватися в IP-пакет, враховуючи MTU всіх протоколів канального рівня у мережі.

#### **3.6.2 Порти й встановлення TCP-з'єднань**

У протоколі TCP, подібно до UDP, використовуються порти для взаємодії з прикладними процесами. Стандартні порти призначаються автоматично (наприклад, 21 – FTP, 23 – telnet), а менш відомі додатки отримують місцеві номери.

TCP використовує порти для створення логічного зв'язку між процесами, що забезпечує надійний обмін даними з підтвердженням та можливістю



повторної передачі. З'єднання в ТСП дозволяє повнодуплексну взаємодію в обидва напрямки.

З'єднання в ТСП ідентифікується адресами взаємодіючих процесів, включаючи IP-адресу та номер порту для кожного кінцевого пункту. Встановлення з'єднання включає ініціювання, відкриття порту, обмін запитами та квитанціями.

### **3.6.3 Концепція квітування**

У межах з'єднання передача кожного сегмента вимагає підтвердження квитанцією від отримувача. Квітування – це метод надійного зв'язку, де відправлені дані нумеруються для організації повторної передачі пошкоджених даних.

Існують два підходи до обміну позитивними та негативними квитанціями: з простоями і методом “вікна”. Метод із простоями обмежує продуктивність, оскільки відправник чекає на квитанцію перед відправленням наступного кадру. У другому методі, використовуючи алгоритм ковзного вікна, можна безперервно передавати кілька кадрів до отримання квитанцій, підвищуючи швидкість обміну даними при регулярних потоках квитанцій.

### **3.6.4 Реалізація ковзного вікна в протоколі ТСП**

У протоколі ТСП використовується алгоритм квітування через вікно, де вікно охоплює безліч нумерованих байтів неструктурованого потоку даних. Квитанції відправляються лише після правильного прийому даних; відсутність квитанції вказує на можливість пошкодження або втрату сегмента. Одержувач відправляє квитанцію, що містить число, перевищуючи максимальний номер байта у отриманому сегменті. Розмір вікна, позначений як  $W$ , визначає кількість сегментів, які можуть бути відправлені перед очікуваною квитанцією, припиняючи передачу, якщо сегмент виходить за межі вікна.

### **3.6.5 Вибір тайм-ауту**

Визначення оптимального тайм-ауту для очікування квитанції є ключовим завданням у протоколі ТСП. Важливо уникати надто короткого тайм-ауту, щоб забезпечити систему від зайвих повторних передач, але водночас уникнути занадто великого тайм-ауту, який призводить до тривалих простоїв. Складний адаптивний алгоритм в протоколі ТСП враховує різні фактори, такі як швидкість і надійність фізичних ліній, довжина зв'язку та інші. Цей алгоритм використовує середні часи оберту з ваговими коефіцієнтами для визначення тайм-ауту, який множиться на коефіцієнт, перевищуючи 2. В мережах з великим розкидом часу оберту також враховується дисперсія цієї величини при виборі тайм-ауту.

### **3.6.6 Реакція на перевантаження мережі**

Зміна розміру вікна впливає на навантаження мережі. Збільшення розміру дозволяє відправити більше даних, але може спричинити черги на маршрутизаторах та ПК. Переповнення буфера може призвести до зменшення вікна в квитанції ТСП або вказання нульового розміру. Відмова від прийому може використовувати біт URG для термінового надсилання, і відправник спробує відновити обмін даними після отримання квитанції з нульовим вікном. Переповнення буферів у маршрутизаторах може змінювати розмір вікна та викликати відправку повідомлень управління для контролю потоку даних.

### **3.6.7 Формат повідомлень ТСП**

ТСП-сегменти складаються з заголовка та блоку даних. Заголовок включає важливі поля, такі як порти джерела та призначення, послідовний та підтверджений номери, довжину заголовка, вікно, контрольну суму, показчик терміновості та опції. Ці елементи ідентифікують відправника та одержувача,

визначають розташування даних у потоці та регулюють різні аспекти обміну даними між вузлами ТСР.

### **3.7 Що таке комутатор Ethernet?**

Ethernet-комутатор – це ключовий інструмент для управління обширними мережами, а основи провідних систем важливі для розуміння його принципів роботи.

#### **3.7.1 Повторювачі**

У 80-х роках Ethernet використовував шинну топологію та сегменти коаксіального кабелю довжиною до 500 м. З метою подолання обмеження довжини використовували повторювачі, які передавали Ethernet-пакети між сегментами, забезпечуючи відновлення електричних сигналів і розширення мережі на коаксіальному кабелі.

#### **3.7.2 Мости й маршрутизатори**

Використання мостів у мережі дозволяє подолати обмеження довжини до 2500 м, фільтруючи та передаючи лише необхідні пакети. Мости створюють окремі середовища для кожного порту, що розширює мережу та забезпечує більшу смугу для користувачів. У новій технології 10Base-T топологія мережі змінилася з шинної магістралі на з'єднання типу "зірка". Маршрутизатори, подібно до мостів, дозволяють сегментувати мережі Ethernet, але їх вартість вища, приблизно \$1,000 за порт.

#### **3.7.3 Перемикання портів**

Сучасні модульні концентратори можуть створювати кілька сегментів і надавати окремі смуги швидкості 10 Mbps для користувачів. Певні концентратори можуть програмно розділяти порти на незалежні сегменти, що

називається перемиканням портів. Це дозволяє адміністратору гнучко організувати сегменти, переносючи порти програмним шляхом, що полегшує розподіл навантаження та знижує витрати. Перемикання портів є статичним, відрізняється від комутації Ethernet.

### **3.8 Атрибути комутаторів Ethernet**

Комутатори Ethernet, так само як мости і маршрутизатори, розділяють мережі Ethernet. Комутатори пересилають пакети між портами, використовуючи адресу одержувача. У відмінності від мостів, комутатори дозволяють одночасні з'єднання між будь-якими парами портів пристрою, розширюючи загальну пропускну здатність мережі. Згідно стандарту IEEE 802.1d, комутатори можуть почати передачу пакета до його повного прийому, відзначаючись від мостів, які повинні чекати.

#### **3.8.1 Віртуальні з'єднання**

Ethernet комутатор використовує внутрішню таблицю для асоціації портів з адресами приєднаних пристроїв. Адміністратор може вручну створити цю таблицю або дозволити комутатору автоматично її створити.

Використовуючи адреси з таблиці та адресу отримувача у пакеті, комутатор формує віртуальне з'єднання між портами відправника та отримувача. Наприклад, на рисунку 3.7 вузол А відправляє пакет вузлу D, і комутатор направляє його через віртуальне з'єднання до порту 4.

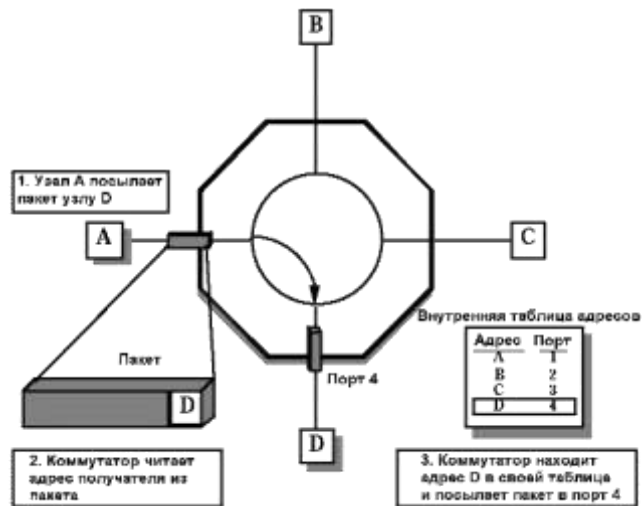


Рисунок 3.7 – Відправлення пакетів

Віртуальне з'єднання існує лише під час передачі конкретного пакета і автоматично створюється для кожного нового пакета на основі адреси отримувача. Комутатори, які дозволяють передачу пакетів тільки до необхідного порту, забезпечують безпеку, що недоступна стандартним Ethernet-повторювачам.

### 3.8.2 Одночасні з'єднання

В комутаторах Ethernet передача даних між портами відбувається незалежно, виділяючи окремі смуги каналу для кожного віртуального з'єднання. Наприклад, 10 Mbps комутатор дозволяє одночасну передачу пакета від A до D і від B до C, забезпечуючи 10 Mbps для кожного з'єднання.

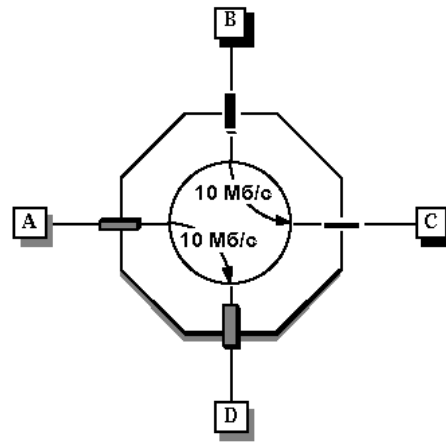


Рисунок 3.8 – Одночасна передача пакетів

Сумарна пропускна здатність комутатора залежить від кількості портів. Наприклад, 24-портовий комутатор Ethernet може забезпечити інтегральну пропускну здатність до 120 Mbps при одночасній організації 12 з'єднань із 10 Mbps для кожного. Втім, внутрішнє блокування може зменшити швидкість пересилання пакетів.

На рисунку 3.9 вузли A, B і D передають дані вузлу C через комутатор.

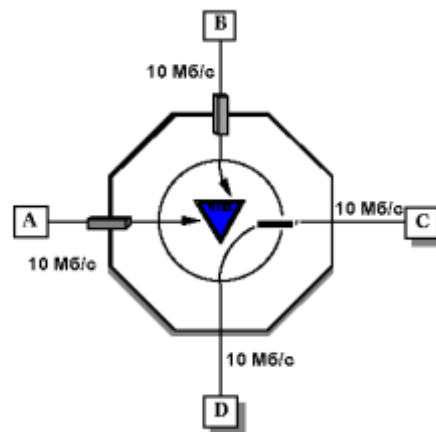


Рисунок 3.9 – Передача вузлів через комутатор

У сценаріях "один до багатьох" комутатор може не досягати максимальної пропускної здатності 10 Mbps, роблячи його менш вигідним у порівнянні з концентратором. Сценарій передачі вузлами через комутатор може

викликати блокування, де пакети від А і В зберігаються до завершення передачі пакета від D.

### **3.8.3 Продуктивність комутатора**

Ключовою характеристикою комутатора є його ефективність, яка визначається параметрами, такими як:

- Швидкість передачі між портами.
- Загальна пропускна здатність.
- Рівень затримки.

### **3.8.4 Швидкість передачі між портами**

На 10-мегабітній Ethernet можна передавати 14880 пакетів за секунду (PPS) для мінімальних пакетів розміром 64 байти. Цей показник обумовлений характеристиками середовища. Комутатор, що може забезпечити цю швидкість між портами, повністю використовує пропускну здатність середовища, щоб забезпечити користувачам максимальну смугу.

### **3.8.5 Загальна пропускна здатність**

Пропускна здатність комутатора, вимірювана у Mbps або PPS, вказує на максимальну можливу швидкість передачі пакетів до отримувачів. У випадку комутаторів із портами, які працюють на швидкості 10 Mbps, загальна пропускна здатність розраховується як швидкість одного порту, помножена на половину кількості портів. Важливою характеристикою ефективного комутатора є відсутність внутрішнього блокування для досягнення максимальної швидкості передачі.

### **3.8.6 Затримка**

Затримка в мережах Ethernet – це інтервал часу між прийняттям та передачею пакета від відправника до одержувача. Комутатори Ethernet

використовують комутацію на льоту, що дозволяє починати передачу до повного отримання пакета, забезпечуючи швидку передачу. Проте цей метод не виконує перевірку пакетів на помилки, що може спричинити колізії та передачу фрагментів із помилками. Буферизація при передачі між портами різної швидкості є необхідною для уникнення помилок, а невелика затримка сприяє продуктивності в мережах з послідовним передаванням даних через віртуальний канал.

### **3.9 Порівняння мережних пристроїв**

#### **3.9.1 Повторювачі**

Повторювачі Ethernet, що використовуються у мережах 10Base-T, часто відомі як концентратори або хаби, діють згідно стандарту IEEE 802.3. Їх головне завдання полягає у передачі пакетів на всі порти, ігноруючи адресата. Навіть при тому, що всі підключені пристрої "бачать" весь мережевий трафік, сам пакет призначений лише конкретному вузлу, який є одержувачем. Проте у деяких випадках, зокрема для аналізаторів протоколів, виявлення усього мережевого трафіку може бути корисним. З точки зору продуктивності, повторювачі використовують повну смугу каналу, забезпечуючи невелику затримку (менше 3 мікросекунд за стандартом IEEE 802.3).

#### **3.9.2 Мости**

Мости працюють за стандартом IEEE 802.1d і, подібно до Ethernet комутаторів, надсилають пакети до визначеного порта при відомому отримувачеві. На відміну від більшості Ethernet комутаторів, мости зберігають фрагменти пакетів у випадку колізій чи помилок, перед тим як відправити їх до порта отримувача. Цей метод буферизації призводить до затримок порівняно із



комутацією на льоту. Продуктивність мостів може дорівнювати пропускній здатності середовища, але внутрішнє блокування трошки уповільнює їх роботу.

### **3.9.3 Маршрутизатори**

Робота маршрутизаторів залежить від мережних протоколів та визначається інформацією, яка передається в пакеті, пов'язаною з протоколом. Схоже на мости, маршрутизатори утримують фрагменти пакетів при колізіях та затримують передачу пакету до повного збереження, що може призвести до затримок. Вони, незважаючи на можливість великої пропускної здатності каналу, мають внутрішні блокування, які відрізняють їх від інших пристроїв, таких як повторювачі, мости та комутатори, оскільки обробляють всі передані пакети.

## **3.10 Класи комутаторів**

### **3.10.1 Комутатори для робочих груп**

Комутатори робочих груп забезпечують високу продуктивність та виділену смугу для пар вузлів, що мінімізує блокування шляхів та дозволяє кільком вузлам 10 Mbps користуватися портом 100 Mbps для звертання до сервера. Також підтримується різна швидкість для об'єднання комутаторів та концентраторів, сприяючи високій продуктивності та уникненню колізій в мережі клієнтів.

### **3.10.2 Магістральні комутатори**

Магістральні комутатори поліпшують з'єднання між сегментами Ethernet, забезпечуючи ефективну передачу пакетів та розділяючи смугу 10 Mbps між вузлами у робочій групі. Це призводить до паралельної передачі пакетів між

будь-якими портами та підвищує продуктивність порівняно з іншими комутаторами та мостами. Використання комутаторів на рівні робочих груп може уникнути затримок і колізій, забезпечуючи ефективну мережу з різними швидкостями портів.

### **3.10.3 Переваги комутаторів Ethernet**

Основні переваги використання комутаторів Ethernet включають:

- Підвищення продуктивності через використання високошвидкісних з'єднань між сегментами Ethernet або вузлами мережі, використовуючи магістральні або групові комутатори.

- Зниження кількості колізій за рахунок підключення кожного користувача до окремого порту комутатора.

- Мінімізація витрат при переході з поділюваного середовища, зберігаючи існуючу інфраструктуру 10 Mbps Ethernet.

- Підвищення безпеки через адресовану передачу пакетів тільки до порту, на який підключений адресат.

- Малий та передбачуваний час затримки завдяки розділенню смуги між невеликою кількістю користувачів, ідеально – одним.

## **3.11 Застосування комутаторів**

### **3.11.1 Об'єднання концентраторів 10Base-T за допомогою магістрального комутатора**

Магістральні комутатори служать ефективною альтернативою багатопротокольним маршрутизаторам для сегментування мережі. При зростанні кількості вузлів мережева продуктивність може сповільнюватися, проте використання магістрального комутатора дозволяє розділити мережу на сегменти, полегшуючи її обслуговування та підвищуючи продуктивність.

Установка такого комутатора представляє собою просте і ефективне рішення для вирішення вказаного завдання.

### **3.11.2 Виділена смуга для кожного користувача**

Магістральні комутатори ефективно сегментують мережу, а комутатори для робочих груп надають кожному користувачеві повну пропускну здатність каналу, підвищуючи продуктивність і уникнення колізій в групі.

### **3.11.3 Робочі групи з декількома серверами**

Якщо всі пристрої взаємодіють з 10Base-T концентратором, продуктивність страждає внаслідок одночасного доступу декількох користувачів до одного сервера. Заміна 10Base-T хаба на комутатор для робочої групи може значно підвищити її продуктивність.

### **3.11.4 Робочі групи з архітектурою клієнт-сервер**

У групах, де основний обсяг трафіку генерується одним сервером, використання комутатора із портами вищої швидкості може значно підвищити продуктивність. З'єднання сервера з портом 100 Mbps дозволяє уникнути проблем при одночасних запитаннях від декількох користувачів, надаючи можливість десяти одночасних підключень із швидкістю 10 Mbps. Також можна використовувати порт 100 Mbps для з'єднання з магістральним комутатором або концентратором 100 Mbps.

### **3.11.5 Об'єднання комутаторів робочих груп і корпоративних серверів**

Для створення розширених мереж Ethernet на базі комутаторів для робочих груп важливо забезпечити швидке з'єднання між комутаторами та

ефективну магістраль для доступу до серверів. Для цього можна використовувати комутатори або хаби 100 Mbps Ethernet, які підключаються до магістралі, де розташовані комутатори робочих груп, як показано на рисунку 3.10.

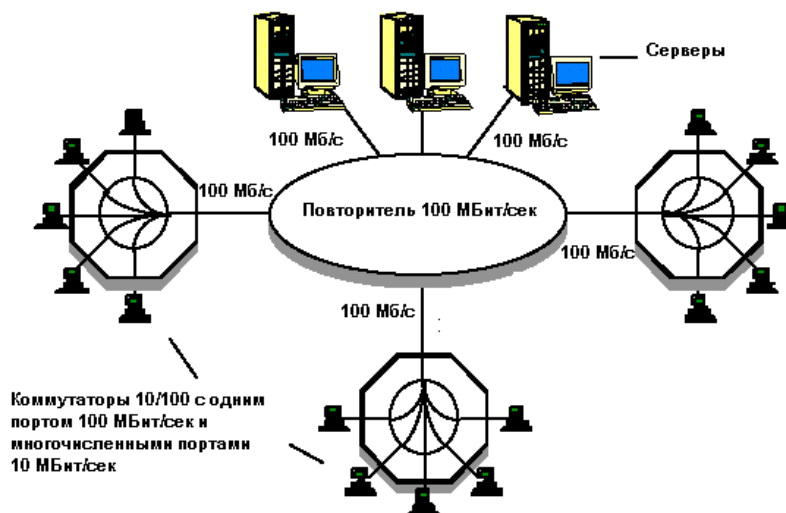


Рисунок 3.10 – Доступ до серверів

Цей підхід гарантує виділену смугу 10 Mbps для зв'язку робочих станцій із серверами, використовуючи комутатор робочої групи та концентратор 100 Mbps Ethernet, що сприяє ефективному доступу до корпоративних серверів.

### 3.12 Висновок до розділу 3

Ethernet комутація – вартісно-ефективна та продуктивна технологія для поліпшення існуючих мереж 10 Mbps Ethernet у медичних установах. Комутатори для робочих груп надають кожному користувачеві (лікаря) окрему смугу, що ефективно поліпшує мережу 10Base-T. Вартість комутаторів на порт порівнянна із сегментними нарощуваними концентраторами. Використання комутаторів для робочих груп з магістралями 100 Mbps дозволяє створювати високопродуктивні мережі, не змінюючи всі існуючі системи.



## РОЗДІЛ 4. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.

### 4.1 Методи і засоби випробувань сучасних цифрових холтерів (CardioSens (ХАІ-Медика))

Мета тестувань холтерів полягає у визначенні параметрів, таких як діапазон вхідних напруг, амплітудна нелінійність, чутливість, швидкість руху носія запису та інші. Ці параметри визначають важливі характеристики цифрових холтерів для надійного збору і аналізу даних ЕКГ.

Перші 14 параметрів повинні відповідати стандарту [21], який рекомендує частоту дискретизації 500 Гц і рівень квантування 5 мкВ/МЗР. Залишкові параметри оцінюють функціональність ПО цифрових електрокардіографів, і МЕК пропонує критерій на основі точності інтерпретації ЕКГ. Випробування має включати схему підключення холтера та тестові сигнали, а розходження між стандартами [30, 21] відзначається у методах подачі постійної напруги +300 мВ.

Для перевірки холтера за ДСТУ 19687-89 [21] слід використовувати сигнали: гармонійної форми (0,5-75 Гц, 0,03-5 мВ), гармонійної форми при 50 Гц (20 В, але можлива менша напруга), періодичного сигналу (1-10 Гц, 0,4-5 мВ), одиночного сигналу (4 мВ, не менше 5 с), та постійної напруги +300 мВ. ГОСТ 19687-89 допускає використання тестових сигналів для перевірки діапазонів і похибок вимірювань, але не надає конкретних характеристик та методів іспитів.

МЕК [30] рекомендує використовувати тестові сигнали для холтерів із точністю не гірше +1% та формами, згідними з перерахованими. Тестові ЕКГ слід взяти із CSE Database [61, 62], яка містить 1220 записів, включаючи калібровані та аналітичні ЕКГ, біологічні ЕКГ, ЕКГ із мережевими перешкодами та нормальні/патологічні випадки для оцінки роботи холтерів та ПЗ.

Вимірювання параметрів цифрових холтерів залежить від аналізу характеристик результатів ЕКГ, забезпечуючи, що ці параметри не перевищують визначених значень. Наприклад, визначення нерівномірності АЧХ ЕКГ виконується за допомогою каліброваних ЕКГ з атласу Загальних Стандартів Електрокардіографії, що дозволяє вимірювати величини амплітуд R, S та відхилення ST сегмента вихідного сигналу. Цей підхід використовується для визначення інших параметрів інтерпретації ЕКГ.

Метод оцінки точності інтерпретації ЕКГ холтером, як запропоновано МЕК [30], ґрунтується на використанні верифікованих тестових ЕКГ сигналів (нормальних і патологічних). Підраховуються числа коректної та некоректної класифікації для обох типів ЕКГ, і точність визначається через формулу

$$TA = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \cdot 100\%.$$

На основі обчислених подій визначають параметри холтерів, такі як чутливість, специфічність, позитивне прогностичне значення для патологій і норми. Для проведення методик іспитів холтерів, згідно зі стандартами, необхідні точні генератори сигналів – імітатори ЕКГ, які мають ряд функцій, включаючи генерацію гармонійного сигналу, видачу постійної напруги, генерацію періодичного сигналу та інші.

Розробка та виробництво імітаторів ЕКС виникли від потреб інтерпретуючих ЕКГ. Розвиток імітаторів пройшов шлях від простих до мікроконтролерних пристроїв. Початкові імітатори використовували вибірку цифрованих сигналів із постійного запам'ятовуючого пристрою та їхнє перетворення на аналого-цифровий сигнал. Структурна схема найпростішого імітатора ЕКС представлена на рисунку 4.1.

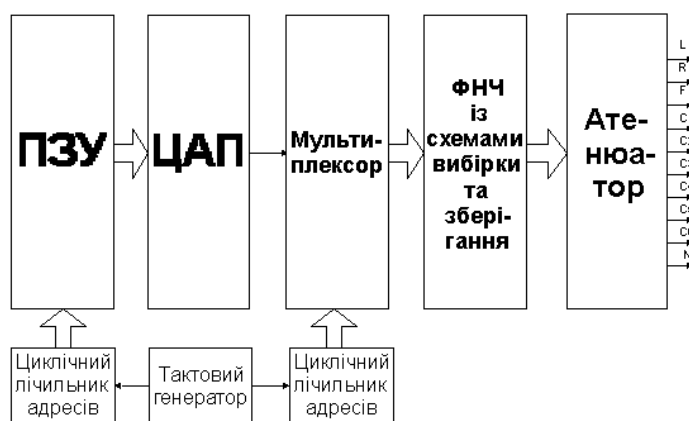


Рисунок 4.1 – Структурна схема найпростішого імітатора ЕКС

Тактові імпульси генератора використовуються для керування циклічним лічильником адрес, який визначає адресу виведеного тестового ЕКС. Адреса подається на постійний запам'ятовуючий пристрій, вихід якого подається на АЦП. Аналоговий вихід підключений до MUX, а кінцеві атенюатори регулюють амплітудні діапазони тестових сигналів. Схожий принцип використовують імітатори ЕКС, що базуються на комп'ютерній платі розширення із АЦП, як зображено на рисунку 4.2.

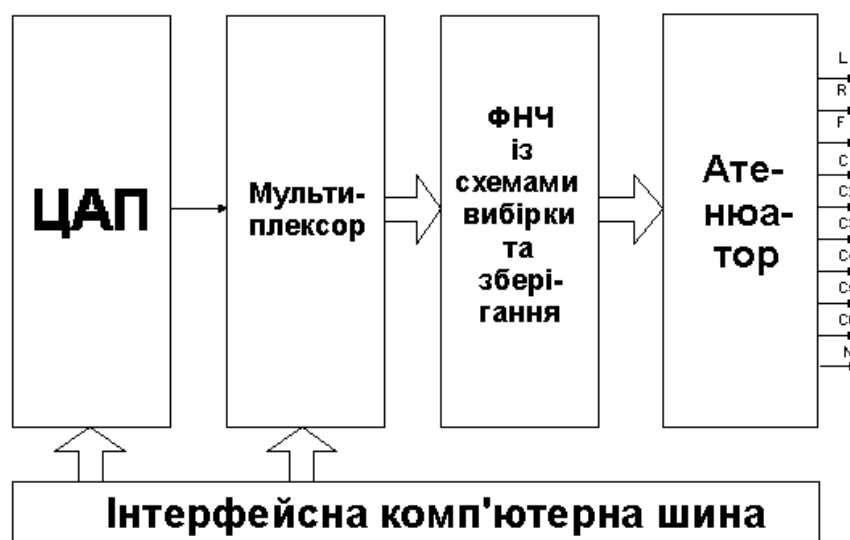


Рисунок 4.2 – Структурна схема комп'ютерного імітатора ЕКС

Керуюча програма цієї плати виконує ролі тактового генератора, циклічних лічильників адрес та постійного запам'ятовуючого пристрою.



Комп'ютерні імітатори ЕКС, хоча і функціонально багатші, залишаються високою вартістю та мають проблему гальванічної розв'язки, що може впливати на якість випробувань ЕКГ. Зазначені недоліки знімаються при використанні імітаторів на основі мікроконтролерів, що є компромісним техніко-економічним рішенням.

У цьому розділі ми розглянемо характеристики сучасних імітаторів ЕКС (див. табл. 4.1). Деякі з приладів також включають функції перевірки пульсоксиметрів, вимірників тиску і температури. Однак тут ми зосередимося на характеристиках тестових сигналів і загальних параметрах приладів, виключаючи моделі з базовими тестовими сигналами, рідкокристалічними індикаторами та комп'ютерними імітаторами. Враховуючи що виробники не повідомляють характеристики тестових сигналів і їхні джерела, порівняння параметрів між приладами та із сигналами з CSE Database стає неможливим.

Таблиця 4.1 – Характеристики сучасних портативних імітаторів ЕКС

Характеристики приладів	Назви приладів			
	PS97	LionHeart 3	ST-10	MiniSim 1000
Діапазон вихідних сигналів, точність	Від 0 до 2 мВ з кроком 0,1 мВ	Від 0,5 до 2 мВ +2% з кроком 0,5 мВ	Від 0,5 до 2 мВ +2% з кроком 0,5 мВ	Від 0,15 до 5 мВ +-1%
Нормальний ритм	Від 20 до 350 уд/хв з +1%	Від 30 до 300 уд/хв	Від 30 до 240 уд/хв +1%	Від 30 до 350 уд/хв +0,1%
ЕКГ аритмії	14 типів	43 типи	8 типів	40 типів
Базові сигнали (типи і їх частотні характеристики)	Гармонійний сигнал, сигнал прямокутної форми, сигнал трикутної форми, імпульсний сигнал з частотними діапазонами від 0,3 до 5,8 Гц	Гармонійний сигнал 0,5, 5, 10, 40, 50, 60, 100 Гц, сигнал прямокутної форми 0,125, 2 Гц, сигнал трикутної форми 2, 2,5 Гц, імпульсний сигнал 0,5, 1 Гц з тривалістю 60 мс.	Гармонійний сигнал 0,5, 10, 40, 50, 60, 80, 100 Гц, біполярний сигнал прямокутної форми 2 Гц, сигнал трикутної форми 2 Гц, імпульс постійного рівня тривалістю 4 с.	Гармонійний сигнал, сигнал прямокутної форми, сигнал трикутної форми з частотними діапазонами від 0,1 до 100 Гц, імпульсний сигнал 0,25 Гц тривалістю 2 мс.

Інтерфейс приладу	ЖКИ 2x20 символів, цифрова клавіатура (21 клавіш)	ЖКИ 4x20 символів, цифрова клавіатура (16 клавіш)	ЖКИ 1x16 символів, цифрова клавіатура (4 клавіші)	ЖКИ 2x16 символів, цифрова клавіатура (8 клавіш)
Габаритні розміри, маса	15.2x26x5.7, 1кг	12.7x17.8x3.8, 568 гр.	16x11x4, 320 гр.	14x8.9x3.8, 43 гр.
Ціна	\$3290	\$1140	\$450	\$595
Фірма	BARCO, США	BIO-TEK INSTRUMENT S, Inc, США	ST- Electromedicina, s.a, Іспанія	Netech Corp., США

Аналізуючи порівняльну таблицю, важливо відзначити наступне:

- Жоден імітатор ЕКС не виробляє сталу напругу +300 мВ, яка надходить на всі вхідні канали ЕКГ незалежно від поточного тестового сигналу.
- Жоден імітатор ЕКС не підтримує суміш сигналів гармонійної і прямокутної форм, що унеможлиблює перевірку нелінійності АЧХ та ефективної ширини запису ЕКГ, як визначено в стандартах [30, 21].
- За допомогою цих імітаторів неможливо перевірити коефіцієнт ослаблення синфазних сигналів, оскільки відсутній гармонійний сигнал із розмахом 20 В та частотами 50 і/або 60 Гц.
- Хоча характеристики точності, діапазонів і типів тестових сигналів частково відповідають вимогам стандартів [30, 21], прилад MiniSim 1000 виявляється найбільш повністю сумісним із цими вимогами порівняно з іншими імітаторами.

З іншого боку, представлені прилади відрізняються функціональністю та зручністю під час періодичного технічного обслуговування клінічних ЕКГ.

#### **4.2 Загальний опис методики оцінки амплітудно-частотних характеристик багатоканальних цифрових холтерів**

В ДСТУ 19687-89 [21] визначено метод обчислення нерівномірності АЧХ ЕКГ. Цей метод використовує виміри вихідних амплітуд гармонійного сигналу, поданого на входи приладу. Трудомісткість методу виникає через потребу в серії вимірів амплітуд для різних значень частоти кожного каналу ЕКГ. При тестуванні цифрових ЕКГ цей метод може викликати “візуальне биття” амплітуди гармонійного сигналу (див. рис. 4.3), особливо коли частота тестової синусоїди перевищує 10% частоти дискретизації сигналів, що ускладнює точне вимірювання АЧХ. З одного боку, цей метод є найбільш доступним способом оцінювання АЧХ аналогових ЕКГ. З іншого боку, цифрові ЕКГ, використовуючи цифрове перетворення сигналів, дозволяють отримувати

цифрові значення сигналів, які можуть бути оброблені методами спектрального аналізу, спрощуючи вимірювання АЧХ каналів приладів. У цьому контексті використання спектрального аналізу для визначення передатних функцій широко розповсюджене в різних галузях, однак, на жаль, джерела, які б описували подібні методи для цифрових ЕКГ, не були знайдені. У цьому розділі представлені можливі методи частотного підходу до визначення АЧХ холтерів. Один із таких методів базується на оцінці частотних спектрів потужності оцифрованих тестових псевдовипадкових сигналів, синтезованих імітатором ЕКС.

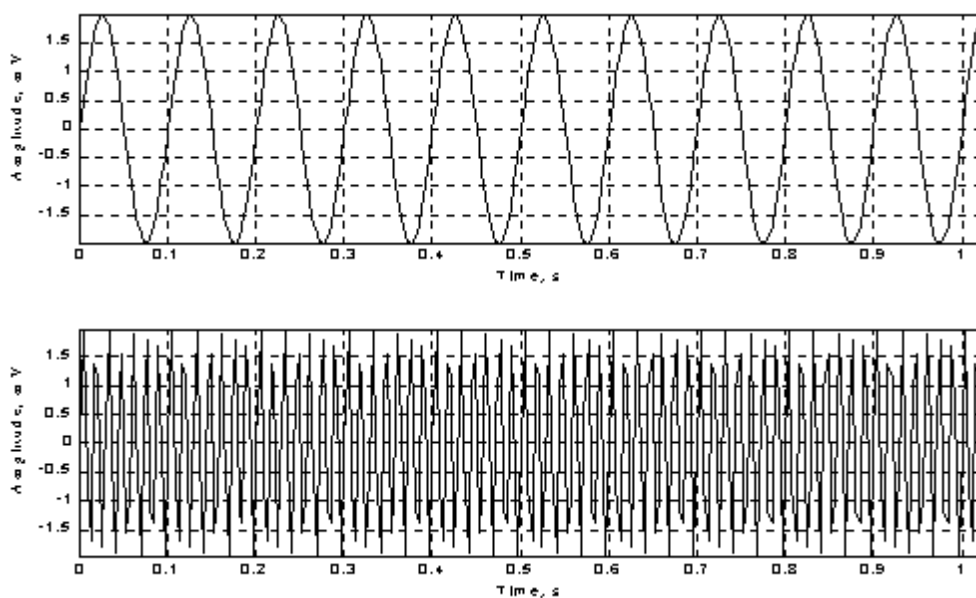


Рисунок 4.3 – Графіки гармонійних сигналів з частотами 10 Гц (верхній) і 70 Гц (нижній) з рівними амплітудами (2 мВ), оцифровані з частотою 250 Гц.

Існують методи генерації ПВС, які відрізняються тим, що всередині певного частотного діапазону мають рівномірно розподілені гармонійні компоненти однакової амплітуди, що визначає постійну СЦП. Під впливом таких сигналів на вхід лінійної системи, яка може бути розглянута як лінійна до АЦП ЕКГ, за принципом суперпозиції на виході системи утворюється сума всіх вхідних сигналів без взаємного впливу. Цей метод дозволяє ефективно ідентифікувати системи, зокрема визначати комплексний коефіцієнт передачі

$F(j\omega)$  елементів системи, шляхом мінімізації часу виміру. Комплексний коефіцієнт передачі  $F(j\omega)$  визначається як відношення вектора  $Y$  вихідної величини системи до вектора  $X$  вхідної величини синусоїдальної форми при певній частоті  $\omega$ . Отримання вихідного вектора  $Y$  можливе шляхом множення вхідного вектора  $X$  на  $F(j\omega)$ , при умові апріорного відомості про комплексний коефіцієнт передачі.

При використанні дискретних значень частот важливо враховувати спектральну щільність амплітуд  $XD(j\omega)$  на вході системи та  $YD(j\omega)$  на її виході, де  $YD(j\omega) = F(j\omega) \cdot XD(j\omega)$ . Оцінка СЦП виражається через оцінку спектральної щільності амплітуд, встановлюючи пропорційність квадратичного модуля між оцінками СЦП на вході і виході системи.

СЦП, визначена модулем спектральної щільності амплітуд, не враховує фазові відносини складового сигналу. Таким чином, взаємозв'язок між СЦП вхідного та вихідного сигналів лінійної системи залежить виключно від АЧХ, позначеної як  $A(\omega)$ . СЦП вхідного та вихідного сигналів вимірюються, а потім обчислюється квадратний корінь від їхнього відношення, що дозволяє визначити АЧХ. Цей метод спрощується, якщо СЦП  $S_w$  тестового сигналу є постійною, і відпадає необхідність вимірювання вхідного тестового сигналу та операції витягування квадратного кореня.

Подача ПВС на вхідні канали ЕКГ відбувається послідовно, при цьому не тестовані канали з'єднуються з нейтральним електродом. Це обумовлено тим, що цифрові дані ЕКГ включають значення ЕКГ відведень, які неможливо розділити на окремі вхідні сигнали у каналах. Для кожної системи відведень потрібно визначити послідовність етапів подачі ПВС та виділення вихідних даних ПВС для тестування каналу. Наприклад, для багатоканальних ЕКГ, що обчислюють стандартні і грудні відведення, порядок подачі ПВС вказано в таблиці 4.2. У цій таблиці "+" позначає подачу ПВС на відповідні канали, а "0" означає, що електрод відповідного каналу з'єднаний з нейтральним електродом. Канали повинні періодично з'єднуватися з нейтральним електродом між етапами, щоб у вихідних даних з'являвся сигнал нульового рівня. Сигнали

відведень відповідають вихідним сигналам певних каналів, і їх АЧХ оцінюють після виділення.

Таблиця 4.2 – Схема подачі ПВС на входи багатоканального ЕКГ

Номер етапу	Випробовувані канали								
	R	L	F	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	+	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	+	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	+	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	+	+	+	+	+	+

### 4.3 Методи оцінок спектральної густини потужності сигналу

На практиці застосовують два методи обчислення СЦП: традиційний і інформаційний. Традиційні методи базуються на застосуванні перетворення Фур'є безпосередньо до сигналу (метод Кулі-Тюкі) або до статистичної оцінки АКФ (метод Блекмана-Тюкі). Роздільна здатність і точність оцінок обмежені тривалістю сигналу або інтервалом кореляційної функції. Для зменшення ефекту усікання використовують спектральні вагові вікна [69, 70, 71, 72].

Традиційна оцінка СЦП  $S(f_k)$  з використанням методу Кулі-Тюкі представлена формулами (4.1) і (4.2),

$$\hat{S}(f_k) = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n |X_i(f_k)|^2, k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (4.1)$$

$$X_i(f_k) = \sum_{t=0}^{N-1} w_t x_{i,t} \exp\left(-\frac{j2\pi kt}{N}\right) \quad (4.2)$$

де  $x_i, t$  – відповідно,  $t$ -й відлік і  $i$ -та реалізація сигналу  $x$ . Значення  $S(f_k)$  обчислюється як середнє значення перетворень Фур'є  $n$  реалізацій сигналу  $x_t = x(t/fs)$ , з використанням формули (4.3),

$$f_k = \frac{k}{N} f_s, k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (4.3)$$

де  $f_s$  – частота дискретизації сигналу  $x$ . Для обчислення перетворення Фур'є використовують алгоритми швидкого перетворення Фур'є [73]. Для придушення просочування енергії з бічних частот застосовують тимчасові вікна, зокрема, косинусоїдальне вікно Хеннінга, визначене формулою (4.4).

$$W_t = \begin{cases} 0.5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi t}{N} \right) \right), & t = 0, 1, \dots, N - 1 \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (4.4)$$

$m = \sum_{t=0}^{N-1} W_t^2$  – нормуючий множник

Довірчий інтервал для  $S(f_k)$ , заснований на оцінці  $\hat{S}(f_k)$ , з імовірністю 1 визначається як:

$$\left[ \frac{r\hat{S}(f_k)}{\chi_{r, a/2}^2} \leq S(f_k) \leq \frac{r\hat{S}(f_k)}{\chi_{r, 1-a/2}^2} \right], \text{ де } r = 2n \quad (4.5)$$

Стандартна помилка оцінки визначає випадкову похибку і матиме вигляд

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Методи спектрального оцінювання, засновані на інформаційному підході, використовують перетворення Фур'є АКФ або безпосередньо до реалізації сигналу. Особливість цього підходу полягає в екстраполяції наявного відрізка кореляційної функції чи сигналу на всю вісь значень аргументу, використовуючи як критерій якості ентропію. Інформаційні методи мають перевагу в підвищеній роздільній здатності, особливо при наявності коротких високоточних результатів вимірювань сигналів або оцінок АКФ. Їхні можливості розширюються завдяки використанню апріорної інформації, такої як середні значення функцій відліків у дискретні моменти часу, попередні оцінки густини потужності чи передбачувана функція розподілу сигналу. Облік апріорної інформації відрізняє інформаційний спектральний аналіз від інших методів спектрального аналізу.

Інформаційну оцінку СЩП застосовують метод максимальної ентропії, використовуючи формули (4.7), (4.8) і (4.9).

$$\hat{S}(f_k) = \frac{p}{|1 + \sum_{i=1}^m a_i \exp(j \frac{2\pi i k}{N})|^2} \quad (4.7)$$

де

$$f_k = \frac{k}{N} f_s, k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (4.8)$$

$$a_i = \begin{cases} \hat{a}_i, & \text{при } i = 1, \dots, m \\ 0, & \text{при } i = m + 1, \dots, N \end{cases} \quad (4.9)$$

Параметр  $m$  визначає порядок спектральної оцінки,  $a\{r, \hat{a}_i\}$  обчислюються з системи рівнянь (4.10),

$$\begin{bmatrix} R_0 & R_1 & \dots & R_m \\ R_1 & R_0 & \dots & R_{m-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_m & R_{m-1} & \dots & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{a}_1 \\ \dots \\ \hat{a}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

де  $R_i$  – значення АКФ сигналу. Використання рекурсивного алгоритму Левінсона-Дербіна дозволяє знизити обсяг обчислювальних ресурсів, враховуючи формули (4.11), (4.12) та (4.13) для обчислення коефіцієнтів.

$$\hat{a}_i^j = \hat{a}_i^{j-1} - \hat{a}_j^j \hat{a}_{j-1}^{j-1} \quad (4.11)$$

$$\hat{a}_i^j = \frac{R_j - \sum_{i=1}^{j-1} \hat{a}_i^{j-1} R_{j-i}}{\rho_{j-1}} \quad (4.12)$$

$$a_1^1 = \frac{R_1}{R_0}, \quad \rho_1 = R_0(1 - |\hat{a}_1^1|^2) \quad (4.13)$$

Для отримання точних інформаційних оцінок СЩП сигналів необхідне усереднення цих оцінок по ансамблю реалізацій сигналу. Довірчий інтервал для  $S(f_k)$ , заснований на усередненні  $n$  оцінок  $S(f_k)$  з імовірністю  $1 - \alpha$ , визначається формулами (4.14) та (4.15). Нормована стандартна помилка отриманої оцінки визначається формулою (4.16).



$$\left[ \frac{r\hat{S}(f_k)}{\chi_{2,a/2}^2} \leq S(f_k) \leq \frac{r\hat{S}(f_k)}{\chi_{r,1-a/2}^2} \right] \quad (4.14)$$

де

$$r = \frac{nN}{m} \quad (4.15)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2m}{nN}} \cdot 100\% \quad (4.16)$$

Наведемо результати оцінки АЧХ для тестового низькочастотного фільтра Баттерворта 6-го порядку з частотою зрізу 70 Гц (див. рис. 4.4).

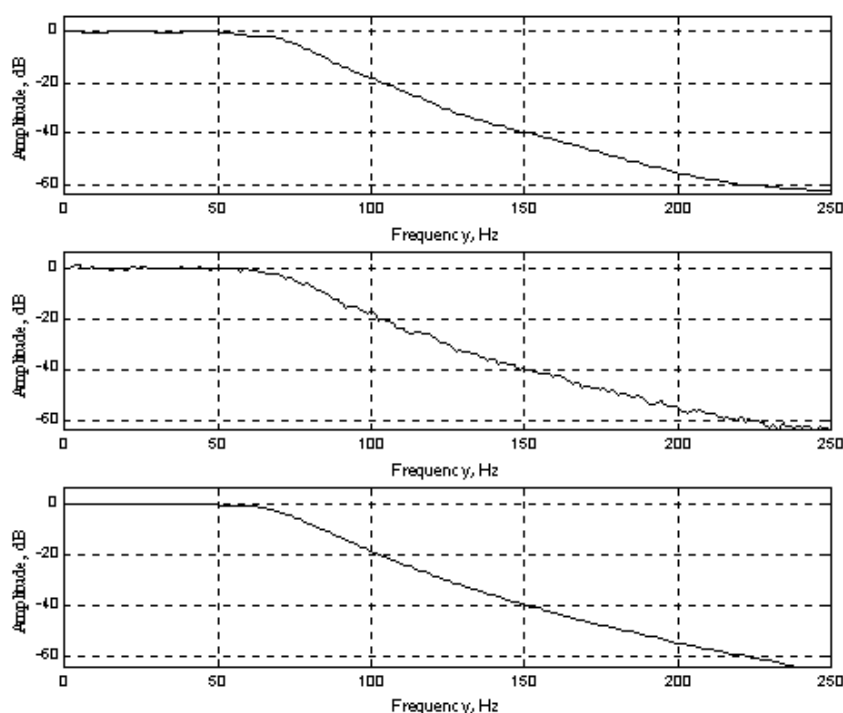


Рисунок 4.4 – Графіки АЧХ НЧ фільтра Баттерворта 6-го порядку, побудовані трьома способами: верхній - інформаційним спектральним оцінюванням, середній - традиційним спектральним оцінюванням, нижній - теоретична АЧХ фільтра

Традиційне оцінювання використовувало процедуру Кулі-Тюкі з ваговим вікном Хенінга, а інформаційне оцінювання – метод максимальної ентропії 10-го порядку. АЧХ отримано усередненням 58 реалізацій СЦП. Теоретичну криву обчислено за відомими формулами [79]. Оцінки АЧХ збігаються з

теоретичною, і статистичні похибки складають 13% для традиційного та 3% для інформаційного спектрального оцінювання. Рекомендується використовувати інформаційне спектральне оцінювання для АЧХ цифрових ЕКГ за допомогою впливу ПВС. Спосіб оцінки АЧХ одного каналу цифрового холтера за цим методом вимагає не більше однієї хвилини, виявивши значні переваги порівняно зі стандартним методом [21].

## РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Питання щодо охорони праці

Планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій.

Метою планування заходів з охорони праці є визначення необхідних вкладень у заходи з охорони праці для ефективного впливу на стан охорони праці.

Система планів з охорони праці окремого підприємства може включати:

- перспективне планування (на період, більший одного року) ;
- поточне планування (на рік) ;
- оперативне планування (детальні плани, спрямовані на вирішення конкретних питань працезахоронної діяльності на підприємстві в короткостроковому, до одного року, періоді).

Планування в охороні праці може включати:

- визначення цілей діяльності з охорони праці на підприємстві та засобів їх досягнення;
- вибір методів і базових показників, за допомогою яких може здійснюватися оцінка необхідних вкладень в охорону праці;
- розрахунок суми вкладень у заходи з охорони праці та раціональний розподіл цієї суми за напрямками діяльності;
- забезпечення організації контролю виконання плану (при необхідності здійснення коригування запланованих показників) ;
- здійснення постійного контролю умов і безпеки праці на підприємстві та оперативне реагування на відхилення від нормативних вимог.

Перспективне планування вміщує найбільш важливі, трудомісткі і довгострокові за терміном виконання заходи з охорони праці, виконання яких, як правило, вимагає сумісної роботи кількох підрозділів підприємства. Можливість виконання заходів перспективного плану повинна бути

підтверджена обґрунтованим розрахунком необхідного матеріально-технічного забезпечення і фінансових витрат з зазначенням джерел фінансування.

До перспективних планів належить комплексний план покращення умов праці і санітарно-оздоровчих заходів, що передбачає створення, відповідно до нормативних актів з охорони праці, умов праці, пов'язаних з перспективними змінами підприємства. Таке планування, як правило, розраховане на термін від 2 до 5 років. Реалізація цих планів забезпечується через річні плани номенклатурних заходів з охорони праці, які вносяться до угоди, що є невід'ємною частиною колективного договору.

Поточне планування здійснюється у межах календарного року через розроблення відповідних заходів у розділі «Охорона праці» колективного договору.

Поточні плани передбачають реалізацію заходів із покращення умов праці, створення кращих побутових і соціальних умов на виробництві. Ці плани обов'язково забезпечуються фінансуванням згідно з розробленими кошторисами.

Питання охорони праці можуть віддзеркалюватися в інших поточних планах, які підприємства та організації можуть складати на вимогу трудових колективів:

- план соціального розвитку колективу;
- наукової організації праці;
- механізації важких і ручних робіт;
- охорони праці жінок;
- підготовки підприємства до робіт в осінньо-зимовий період;
- підвищення культури виробництва та ін.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці в структурних підрозділах і на підприємстві в цілому.

Оперативні плани складаються для швидкого виправлення виявлених в процесі державного, відомчого і громадського контролю недоліків в стані охорони праці, а також для ліквідації наслідків аварій або стихійного лиха.

Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються безпосередньо у наказі власника підприємства, який видається за підсумками контролю, або у плані заходів, як додатку до наказу.

Організаційно-методичну роботу щодо складання перспективних, поточних та оперативних планів здійснює служба (спеціаліст) охорони праці.

## **5.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях**

*Здійснення заходів щодо зниження дії радіоактивних випромінювань на радіоелектронну апаратуру зв'язку, радіомовлення і телебачення [5]*

Оцінка уразливості лабораторного блока живлення від радіоактивного забруднення і проникаючої радіації починається з визначення максимальних очікуваних значень рівня радіації і дози проникаючої радіації. За показник стійкості об'єкта приймається допустима доза радіації, яку можуть одержати люди за час робочої зміни.

Для характеристики радіоактивного забруднення застосовують ступінь (щільність) забруднення, який характеризується поверхневою щільністю забруднення радіонуклідами і вимірюється активністю радіонукліда на одиницю площі (об'єму). Основною дозиметричною величиною, за допомогою якої оцінюється дія радіації, є доза випромінювання - кількість енергії, яка поглинута одиницею маси опроміненого середовища. Експозиційна доза визначається тільки для повітря при гама і рентгенівському випромінюванні. Поглинута доза визначається для речовин. Місцевість, що забруднюється внаслідок радіаційної аварії, за щільністю забруднення радіонуклідами умовно поділяють на зони: зону відчуження, зону безумовного (обов'язкового) відселення, зону гарантованого (добровільного) відселення і зону підвищеного радіоекологічного контролю.[5]

За дозами опромінення зону забруднення поділяють на наступні зони: надзвичайно-небезпечного забруднення, небезпечного забруднення, сильного забруднення, помірного забруднення, і зону радіаційної небезпеки.

Також радіоактивне забруднення буде безпосередньо впливати лабораторного блока живлення, але і на його конструкцію, оскільки, до його складу входять металеві провідники з ізоляційним покриттям, металічний корпус, пластмасові роз'єми і самі радіоелементи (резистори, транзистори, мікросхема, конденсатори, діоди).

Органічні речовини вельми чутливі до радіації. Вплив радіації призводить до перетворення молекул, що супроводжується хімічними реакціями, що викликають незворотні зміни природи речовини і її механічних властивостей.

Перетворення супроводжується виділенням газів, які в поєднанні з вологою утворюють кислоти, які здійснюють шкідливий вплив на ізоляційні матеріали. Більшість пластмас отримує механічне пошкодження навіть при малих дозах радіації.

Фенолформальдегід і метилметакрилат стають крихкими і деформуються. Поліетилен і полістирол - спочатку збільшується опір розриву і твердість, а потім вони стають крихкими. Більшість пластмас темніє і знебарвлюється. Просочення і ізоляційні масла псуються, як і оргматеріали. Синтетичний каучук і кремнійорганічна гума твердіють

Зміна електричних властивостей органічних речовин (провідність, діелектрична проникність, кут втрат) має оборотний характер. Час відновлення залежить від природи матеріалу та умов опромінення.

На неорганічні речовини (матеріали) радіація впливає менше, ніж на органічні. При опроміненні нейтронами можливо об'ємне розширення. Кварц і скло втрачають прозорість при великих дозах.

Вплив радіації на напівпровідниковий діод залежить від того, який ефект використаний в основі його роботи, виду матеріалу, питомого опору його, а також конструктивних особливостей діода. Оскільки в підсилювачі використані лише кремнієві діоди то розглянемо лише їхню реакцію. [5]

Під впливом нейтронної радіації провідність точково-контактних діодів зменшується в прямому і зворотному напрямках; у площинних діодів провідність у прямому напрямку також зменшується. Пошкодження діодів обумовлюється зміною характеристик провідності в прямому напрямку. Вплив  $\gamma$ -опромінення викликає оборотні зміни зворотного струму.

Характеристика впливу радіоактивного забруднення на транзистор. Вплив опромінення викликає порушення кристалічної решітки матеріалу (основний ефект) і іонізацію (вторинний ефект). Внаслідок цього змінюються параметри напівпровідникових матеріалів – час життя основних носіїв, питома провідність, швидкість поверхневої рекомбінації дірок з електронами. Внаслідок зміни вищевказаних параметрів зменшується коефіцієнт підсилення по струму, збільшується зворотний струм колектора, зростають шуми транзистора.

Іонізація, створювана радіацією, інjektується надлишок носіїв у транзистор, внаслідок чого виникають значні шуми. Зміна коефіцієнта посилення є незворотнім, а зміни зворотного струму можуть бути оборотними і необоротними. Як бачимо змінюється основний із електричних параметрів підсилювача – коефіцієнт підсилення, а отже вихідна потужність.

Потрібно зазначити, що більшу радіаційну стійкість мають германієві транзистори в порівнянні з кремнієвими.

До основних методів захисту радіоелектронної апаратури відносять такі конструктивні рішення:

- правильно підбирати і розташовувати елементи;
- ширше використовувати керамічні ізолятори в частинах перемикачів, роз'ємах, гніздах і т.д.;
- застосовувати склотканина та інші неорганічні матеріали для манжет, кабельної ізоляції тощо;
- застосування елементів з неорганічних матеріалів, слюдяних і керамічних конденсаторів;
- застосовувати плівкові і металоплівкові опори;

- ретельно продумувати схему розташування, для зменшення струмів витоку і пробою;
  - екранувати найбільш чутливі елементи;
  - правильно вибирати матеріали деталей конструкції;
  - правильно вибирати напівпровідникові прилади (надавати перевагу германієвим).
- Для захисту від  $\gamma$  - променів добре екранують, захищають - свинець, вісмут, вольфрам, золото, платина, ртуть і деякі інші важкі матеріали. [5]

### **5.3 Висновки до розділу**

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» розглянуто планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій. Також описано заходи щодо зниження дії радіоактивних випромінювань у відповідності Закону України від 08.02.1995 № 39/95-ВР «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку». [41]



## ВИСНОВКИ

Під час досліджень визначено, що для передачі дискретизованих КС у пакетному режимі потрібна мінімальна швидкість передачі  $V_{min} = 9$  Кбіт/с. З урахуванням цього значення обрані відповідні протоколи передачі даних та відібрані апаратні засоби для надійного та безперебійного пересилання пакетів інформації через комп'ютерні мережі.

Основні переваги TCP/IP:

– Сімейство протоколів ґрунтується на відкритих стандартах, доступних та розроблених незалежно від конкретного обладнання чи ОС. Це робить TCP/IP найпоширенішим для об'єднання різноманітного обладнання та ПЗ.

– Протоколи TCP/IP не залежать від конкретного мережного обладнання фізичного рівня, що дозволяє їх використання в різних типах мереж, таких як Ethernet, Token-Ring, X.25.

– Гнучка схема адресації протоколів TCP/IP дозволяє однозначно адресувати пристрої в будь-якій мережі, навіть на різних рівнях доступу, включаючи Internet.

– Сімейство TCP/IP включає стандартизовані протоколи високого рівня для підтримки прикладних мережних послуг, таких як передача файлів, віддалений термінальний доступ, обмін повідомленнями електронної пошти та інші.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Буров Є.В. Комп'ютерні мережі: Підручник // Є.В. Буров. – Львів: Магнолія 2006, 2010 . – 262 с.
- 2 Калита Д.М. Комп'ютерні мережі. Апаратні засоби та протоколи передачі даних: Навчальний посібник. За ред. О.В. Третяка. К.:ВПЦ "Київський університет", 2003 .-327
- 3 Сучасні інформаційні технології – Сучасні інформаційні технології – електронний посібник у форматі pdf. URL: [sit.fizmat.tnpu.edu.ua/teor\\_mat/Comp\\_mereg.pdf](http://sit.fizmat.tnpu.edu.ua/teor_mat/Comp_mereg.pdf)
- 4 Курс лекцій з курсу «Комп'ютерні мережі». URL: <http://programming.in.ua/other-files/other/60-curs-comp-merezi.html>
- 5 Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С. Стручок. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
- 6 Методичні рекомендації до виконання, оформлення та захисту кваліфікаційних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія» галузі знань 16 «Хімічна інженерія та біоінженерія» / уклад.: Хвостівський М.О., Яворська Є.Б. Тернопіль: ТНТУ, 2023. 57 с.
- 7 Chou T.C. Electrocardiography in Clinical Practice, 3d. ed., Philadelphia, Saunders, 1991 – 734P.
- 8 Гезеловіц Д. Б. До теорії електрокардіограми.- ТШЕР.-1989.-Т. 77.- №6.-С. 34-55.
- 9 Інструментальні методи дослідження серцево-судинної системи (Довідник)/Під ред. Т.С. Виноградової. - М.: Медицина, 1986 - 416с.
- 10 Цимерман Ф. Клінічна електрокардіографія. - М.: Східна Книжкова Компанія, 1997, - 448с.

- 11 Титомир Л. І. Автоматичний аналіз електромагнітного поля серця.- М.: Наука.-1984.-175с.
- 12 Шакін В. В. Обчислювальна електрокардіографія.- М.: Наука.-1981.-166с.
- 13 Дабровські А., Дабровські Б., Піотрович Р. Добове моніторування ЕКГ. - М.: Медпрактика,- 1998.- 208 с.
- 14 Medical electrical equipment, Part 2, Particular requirement for the essential performance of recording and analysing electrocardiographs. // ІЕС.- Geneva.-1996.-75р.
- 15 Шакін В. В. Обчислювальна електрокардіографія.- М.: Наука.-1981.-166с.
- 16 Прилади для вимірювання біоелектричних потенціалів серця. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. ГОСТ 19687-94.- М.: Видавництво стандартів.-1994-19с.
- 17 Кардіомонітори. Апаратура безперервного контролю ЕКГ: Навчальний посібник для вузів. Під ред. А. Л. Барановського і А. П. Немирко.- М.: Радіо і зв'язок.-1993--248с.
- 18 Цифрове оброблення сигналів. Довідник. Гольденберг Л. М. та ін. - М.: Радіо і зв'язок.-1985.-312с.
- 19 Електроди для знімання біоелектричних потенціалів. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. ГОСТ 25995-86. - М.: Видавництво стандартів, 1986.-25с.
- 20 Баскаков С. І. Радіотехнічні ланцюги і сигнали: Підручник для вузів за спеціальністю "Радіотехніка". - М.: Вища школа, 1998.-448с.
- 21 Аміров Р. З. Інтегральні топограми потенціалів серця. // М.: Наука.-1973.-108с.
- 22 Теоретичні основи електрокардіології. Під.ред. К. В. В. Нельсона, Д. В. Гезеловица: - М.: Медицина.-1979.-470с.
- 23 Титомир Л. І. Автоматичний аналіз електромагнітного поля серця.- М.: Наука.-1984.-175с.

24 ANSI-AAMI EC18-1982 American National Standard for Diagnostic electrocardiographic Devices, American Association for the Advancement of Medical Instrumentation. Arlington, Virg., 1983.

25 Методи автоматичного аналізу електрокардіограм / Оглядова інформація. Промисловість медичної техніки. - М.: Центральне бюро науково-технічної інформації Міністерства медичної та медикобіологічної промисловості, 1986 - 32 с.

26 Льюнг Л. Ідентифікація систем. Теорія для користувачів. - М.: Наука, 1991. - 432с.

27 Денда В. Шум як джерело інформації - М.: Мир, 1993. 192 с.

28 Макс Ж. Методи і техніка оброблення сигналів під час фізичних вимірювань. У 2 т. - М.: Мир, 1983. - Т.1., 312с.

29 Борисов Ю.П. Пеннін П.І. Основи багатоканального передавання інформації.М. Зв'язок.1967

30 Теорія інформації та її додатки. Під ред.А.А. Харкевича. М.ГІФМЛ.1959

31 Харкевич А.А.Про теорему Котельникова. Оглядова стаття. "Радіоелектроніка" 1958.№8

32 Ю. Блек. Мережі ЕОМ. Протоколи. Стандарти. Інтерфейси. (Перев.сангл.) М.Мир.1990.

33 Data communication Network Interfaces Volume 8 ССІТТ Plenary Assembly October8-19 1984 (Malaga-Torremolinos).

34 Статистика помилок при передачі цифрової інформації. Під ред. к.т.н. С.І.Самойленка (перев.з англ.) М. Мир.1966.

35 Муттер В.М. Основи завадостійкої телепередачі інформації. Л. Енергоатоміздат. 1990. 228с

36 Гольденберг Л.М. та ін. Цифрова обробка сигналів. Довідник. М. Радіо і зв'язок. 1985. 312с

37 Networking & Multimedia. Tool Catalogue Vol.4 Rochelle Park,NJ:Hayden Book Inc.1999

38 Internet без проблем. “Компютерний огляд” с.12-15.2002 №6 с.12-15.2002

39 Terminal Equipment and Protocols for Telematic Systems Volume 7  
CCITT Plenary Assembly October 8-19 1984 (Malaga-Torremolinos).

40 Jordan L.E. Churchill B. Communications and Networking for the IBM-PC  
Bowie, Maryland 1993

41 Закон України від 08.02.1995 № 39/95-ВР «Про використання ядерної  
енергії та радіаційну безпеку».

# ДОДАТКИ

**Теза конференції**