

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.М. Лисенко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ 19 ” червня 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Інформаційно-обчислювальні засоби
радіоелектронних систем»
(назва)

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і назва)

на тему: Система визначення типу модуляції сигналів

Виконав : студент 4 курсу, групи ДК-01
(шифр групи)

Овейчик Володимир Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: доцент, к.т.н., Іваннік Г.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент кафедри АМЕС факультету електроніки

КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.т.н., доцент Попович П.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (підпис)

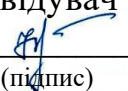
Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри


(підпис)

Лисенко О.М.
(прізвище ініціали)

« 08 » лютого 2024р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту

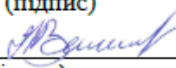
Овейчик Володимир Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема проєкту «Система визначення типу модуляції сигналів
керівник проєкту Іваннік Геннадій Васильович, доцент
затверджені наказом по університету від 23.05.2024 року № 2076-с
 - Термін подання студентом проєкту 10 червня 2024 року
 - Вихідні дані до проєкту. Система призначена для визначення типу модуляції сигналів. Функціональні властивості. Система повинна визначати наступні види модуляції: QPSK, 8PSK, BPSK, QAM16, QAM64 (опціонально). Система являє собою плату, яка може функціонувати як самостійний пристрій, так і в складі інших систем радіозв'язку, радіомоніторингу тощо. Кліматичне виконання: використання в сухих не опалюваних приміщеннях, з природньою вентиляцією. Габаритні розміри – не більше 200 мм×200 мм×100 мм, маса – не більше 500 г. Напруга живлення – 12 В.

- Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
 - розробка структурної схеми пристрою;
 - вибір та обґрунтування елементної бази;
 - розробка схеми електричної принципової;
 - проектування друкованого вузла, розміщення компонентів на друкованій платі пристрою;
 - конструкторсько - технологічні розрахунки друкованої плати;
 - проектування друкованої плати у САПР Altium Designer;
 - електричний розрахунок друкованої плати пристрою;
 - розробка програмного забезпечення.
- Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):
 - схема електрична принципова – А2; А3;
 - креслення друкованої плати – А1, А3;
 - складальне креслення – А1; А2
- дата видачі завдання 08.02.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз технічного завдання та огляд аналогів	10.02.24 – 20.02.24	виконано
2	Схемотехнічне проєктування	21.02.24 – 10.03.24	виконано
3	Вибір та обґрунтування елементної бази	11.03.24 – 16.03.24	виконано
4	Проектування ДП в Altium Designer, розміщення КЕ на монтажному просторі	17.03.24 – 25.03.24	виконано
5	Виконання конструкторсько-технологічних розрахунків	26.03.24 – 05.04.24	виконано
6	Розрахунок електричних параметрів	06.04.24 – 12.04.24	виконано
7	Розрахунок надійності	13.04.24 – 17.04.24	виконано
8	Розробка програмного забезпечення	18.04.24 – 10.05.24	виконано
9	Виконання креслення схеми принципової. Створення переліку елементів	11.05.24 – 15.05.24	виконано
10	Виконання креслення друкованої плати	16.05.24 – 20.05.24	виконано
11	Виконання складального креслення. Створення специфікації до складального креслення	21.05.24 – 23.05.24	виконано
12	Оформлення пояснювальної записки	24.05.24 – 31.05.24	виконано

Студент  Овейчик В.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)
 Керівник проєкту  Іваннік Г.В.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Створення системи для визначення типу модуляції сигналів. Ця тема вибрана через свою високу актуальність на даний час, особливо, у галузі радіомоніторингу. Причина - модуляцію сигналів широко застосовують і для коректного отримання даних з сигналів, важливо знати тип модуляції. Основною метою роботи поставлено: розробка пристрою, який визначатиме тип модуляції сигналів. Основним завданням в роботі поставлено: створення друкованого вузла пристрою та генерація нейронної мережі для проєкту. Основним об'єктом в процесі розробки стала саме нейронна мережа, від якої залежить вся процедура визначення типу модуляції. В роботі застосовані передові технології та сучасні рішення для виконання поставлених завдань. В роботі розглянуто наступні питання: огляд існуючих рішень, вибір елементної бази, конструкторсько-технологічні розрахунки та рішення, розробка програмного забезпечення та тестування напрацювань. В результаті роботи розроблена система, яка виконує поставлену задачу: визначення типу модуляції сигналів. Складено висновки до роботи, та запропоновані шляхи покращення технічних характеристик пристрою.

Abstract

Creating a System for Determining the Type of Signal Modulation. This topic was chosen due to its high relevance today, especially in the field of radio monitoring. The reason is that signal modulation is widely used, and for the correct reception of data from signals, it is important to know the type of modulation. The main goal of this work was to develop a device that determines the type of signal modulation. The primary task was the creation of the device's printed circuit board and the generation of a neural network for the project. The central focus of the development process was the neural network, on which the entire procedure of identifying the modulation type depends. Advanced technologies and modern solutions were employed to achieve the set tasks. The work covers the following topics: an overview of existing solutions, selection of component base, design and technological calculations and solutions, software development, and testing of the results. As a result of the work, a system that performs the task of identifying the type of signal modulation was developed. Conclusions were drawn from the work, and improvements to the device's technical characteristics were proposed.

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: **Система визначення типу модуляції сигналів**

Київ – 2024

Зміст

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів	4
Вступ.....	6
Розділ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА РОЗГЛЯД АНАЛОГІВ	7
1.1 Модуляція радіосигналів.	7
1.2 Напрямки використання системи визначення типу модуляції радіосигналів.....	11
1.3 Основні методи визначення типу модуляції сигналів.	11
1.4 Приклади методів визначення модуляції сигналів та їх аналіз.	12
1.5 Патентний пошук	17
1.6 Аналіз технічного завдання.....	17
Висновок до розділу 1.....	18
Розділ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ	19
2.1 Опис та аналіз схеми електричної структурної.....	19
2.2 Опис та аналіз схеми електричної принципової	22
2.3 Обґрунтування вибору елементної бази пристрою.	23
2.3.1 Вибір FPGA мікросхеми.....	23
2.3.2 Вибір резисторів.	27
2.3.3 Вибір конденсаторів.....	28

					<i>ДК01.414435.001 ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата			
Розробив		Овейчик В.В.		28.05	Система визначення типу модуляції сигналів. Пояснювальна записка	Літ.	Арк.
Перевірив		Фабрикатор М.		28.05			1
Реценз.						Архів	
Н. Контр.		Лисенко О.І.		12.06		КПІ ім. І. Сікорського, ФЕЛ, гр. ДК-01	
Затвердив		Іваннік Г.В.		12.06			

2.3.4	Вибір діодів.....	29
2.3.5	Вибір транзистора	29
2.4	Посадкові місця	29
	Висновок до розділу 2.....	30
Розділ 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ		31
3.1	Вибір друкованої плати	31
3.1.1	Вибір типу друкованої плати	31
3.1.2	Вибір матеріалу друкованої плати	32
3.1.3	Метод виготовлення ДП.....	35
3.1.4	Вибір класу точності.....	36
3.2	Конструкторсько-технологічні розрахунки.....	38
3.2.1	Розрахунок маси пристрою	38
3.2.2	Розрахунок надійності	39
3.3	Електричний розрахунок пристрою	44
3.3.1	Визначення падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику.....	44
3.3.2	Визначення потужності втрат друкованої плати	45
3.3.3	Визначення ємності між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні друкованої плати і мають однакову ширину	46
3.3.4	Визначення взаємної індуктивності двох паралельних провідників однакової довжини	46
3.4	Проектування друкованої плати пристрою	47
	Висновок до розділу 3.....	48

Розділ 4. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	50
4.1 Вибір програмного забезпечення для розробки.....	50
4.2 Загальна структура програмного забезпечення	52
4.3 Програмне забезпечення мережевої частини	52
4.4 Розробка нейронної мережі	52
4.4.1 Генерація зразків	52
4.4.2 Створення моделі нейронної мережі.....	55
Висновки до розділу 4.	58
Розділ 5. ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ.....	59
5.1 Стенд для тестування.....	59
Висновки до розділу 5.	62
Висновки	63
Список використаних джерел	65
Додатки.....	67
Додаток А. Технічне завдання на проєктування.....	67
Додаток Б. Скрипт генерації іq файлів з даними	73
Додаток В. Makefile для автоматичного запуску скрипта генерації даних.	79
Додаток Г. Скрипт генерації моделі нейронної мережі	82

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

2ASK (Amplitude Shift Keying) – дворівнева амплітудна маніпуляція

4ASK(Amplitude Shift Keying) – чотирирівнева амплітудна маніпуляція

8PSK – (Phase Shift Keying) – восьмирівнева фазова маніпуляція

AM (Amplitude Modulation) – амплітудна модуляція

AM-DSB (Amplitude Modulation Double Side Band) – двосмугова амплітудна модуляція

ASK (Amplitude Shift Keying) – амплітудна маніпуляція

BGA (Ball grid array) – тип корпусу мікросхем для поверхневого монтажу на плату

BPSK (Binary Phase Shift Keying) – бінарна фазова маніпуляція

CLDNN (Compute Library for Deep Neural Networks) – нейронна мережа глибокого комп'ютерного навчання

CNN (Convolutional Neural Network) – згорткова нейронна мережа

CPFSK (Continuous Phase-frequency Shift Keying) – безперервна фазо-частотна маніпуляція

FM (Frequency Modulation) - частотна модуляція сигналу

FPGA (Field-Programmable Gate Array) - програмована користувачем вентильна матриця

FSK (Frequency Shift Keying) – частотна маніпуляція

GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) - гаусівська частотна маніпуляція

I2C - послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем

IQ – квадратурний сигнал

LSTM (long short-term memory network) довготривала швидкозапам'ятовуюча пам'ять

PAM4 (phase-amplitude modulation) – фазо-амплітудна чотирирівнева модуляція

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		4

PFSK (Phase-frequency Shift Keying) – фазо-частотна маніпуляція

PSK (Phase Shift Keying) – фазова маніпуляція

QAM16 (Quadrature Amplitude Modulation) – 16-позиційна квадратурна амплітудна модуляція

QAM64 (Quadrature Amplitude Modulation) – 64-позиційна квадратурна амплітудна модуляція

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурна фазова маніпуляція

ResNet (Residual Neural Network) – остаточна нейронна мережа

SMD (surface mount device) – компоненти поверхневого монтажу

SNN (sequential neural network) – послідовна нейронна мережа

SRCNN (Super-Resolution Convolutional Neural Network) - Згорткова нейронна мережа супер роздільності

WBFM (Wideband Frequency Modulation) – широкополосна частотна модуляція

БДП – багатошарова друкована плата

ДДП – двостороння друкована плата

КЕ – конструкторський елемент

КМ – контактний майданчик

КС – координатна сітка

ОДП – одностороння друкована плата

ПЗ – програмне забезпечення

ПМ – посадкове місце

САПР – система автоматизованого проектування

ТЗ – технічне завдання

ШІ – штучний інтелект

					<i>ДКО1.4 14435.001 ПЗ</i>	Арх.
<i>Змн.</i>	<i>Ар</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

Вступ

Завдання визначення типу модуляції радіосигналів у наш час, не втратило своєї актуальності. Особливо це питання стосується галузей радіоелектроніки, які, в свою чергу, працюють безпосередньо з радіосигналами.

Відомо, що сучасні радіосистеми використовують різні типи модуляції, це пов'язано перш за все з тим, щоб передати низькочастотні сигнали на високі відстані потрібно збільшувати потужність випромінювання, а також для ефективного випромінювання потрібно, щоб розмір антени, був порівняний з довжиною хвилі сигналу. Коли використовуються сигнали низькочастотного діапазону то довжина хвилі, сягає кілометрів і побудувати таку антену технічно складно. Таким чином наклавши низькочастотний сигнал на високочастотну складову, можна передати цей сигнал з меншими витратами та не використовуючи додаткових матеріально-технічних ресурсів. І це не єдина перевага використання модуляції для радіосигналів, до переваг також можна віднести: ефективність використання каналу, мінімізація спотворень, захист від перешкод, тощо.

Коли ми знаємо тип модуляції радіосигналу передавача та використовуємо приймач з демодулятором необхідної нам модуляції, то особливого значення прилад для визначення типу модуляції радіосигналів не несе. Проте це завдання має високу актуальність у задачах отримання інформації, у випадках коли ми не знаємо, який тип модуляції використовується, про те ми точно знаємо, що сигнал є і нам потрібно отримати з нього інформацію. А для того щоб отримати інформацію радіосигнал необхідно пропустити через демодулятор, проте ми повинні точно знати тип модуляції радіосигналу для використання правильного демодулятора. Дана задача особливо актуальна в системах радіомоніторингу, радіозв'язку та пеленгації (як додаткова опція для встановлення джерела випромінювання).

Саме через свою високу актуальність, темою для дипломного проєктування було вибрано розробку системи для автоматичного визначення типу модуляції сигналів.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		6

Розділ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА РОЗГЛЯД АНАЛОГІВ

Даний розділ описує, що таке модуляція сигналу, для чого використовується. Має опис загальних понять, які використовуються для роботи з модуляцією сигналу. Розділ вміщує, також, опис аналогів на вітчизняному та закордонному рівні, можливі прийоми визначення типу модуляції сигналів, їх переваги та недоліки. В кінці розділу зроблено висновок та обрано напрямок руху для подальшої роботи проектування системи визначення типу модуляції сигналів, відповідно до аналізу переваг та недоліків вже побудованих систем.

1.1 Модуляція радіосигналів.

Модуляція радіосигналів – це процес зміни параметрів сигналу шляхом накладання низькочастотної складової на несучий сигнал високої частоти. Модуляція сигналів необхідна для передачі низькочастотних сигналів на високу відстань. Відомо, що для ефективної передачі радіосигналу, необхідно, щоб розміри антени були одного порядку з довжиною хвилі, яка буде передаватися за допомогою цієї антени. При передачі сантиметрового та метрового діапазону радіохвиль, тут відсутні проблеми в проектуванні антен, проте коли довжина хвилі сягає сотні метрів чи більше кілометра, в даному випадку побудувати антену, складна задача. Тому рішенням для передачі сигналів низькочастотного діапазону, є використання модуляції, тобто передачі накладеного низькочастотного сигналу на високочастотну складову.

В загальному існує три основних види модуляції радіосигналів, всі решта типів похідні від основних.

Першим типом є FM (frequency modulation) - частотна модуляція сигналу. Даний тип модуляції представлений тим, що амплітуда сигналу постійна, а лише змінна частота, за допомогою якої і передається корисний низькочастотний сигнал.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		7

Наступним типом модуляції радіосигналу є АМ (amplitude modulation) – амплітудна модуляція, в даному типі модуляції сигналу, зміна параметру відбувається навпаки як для FM, тобто частота постійна, а корисний сигнал передається за допомогою використання зміни амплітуди. На рис.1.1 показано різницю між АМ та FM в часовій області.

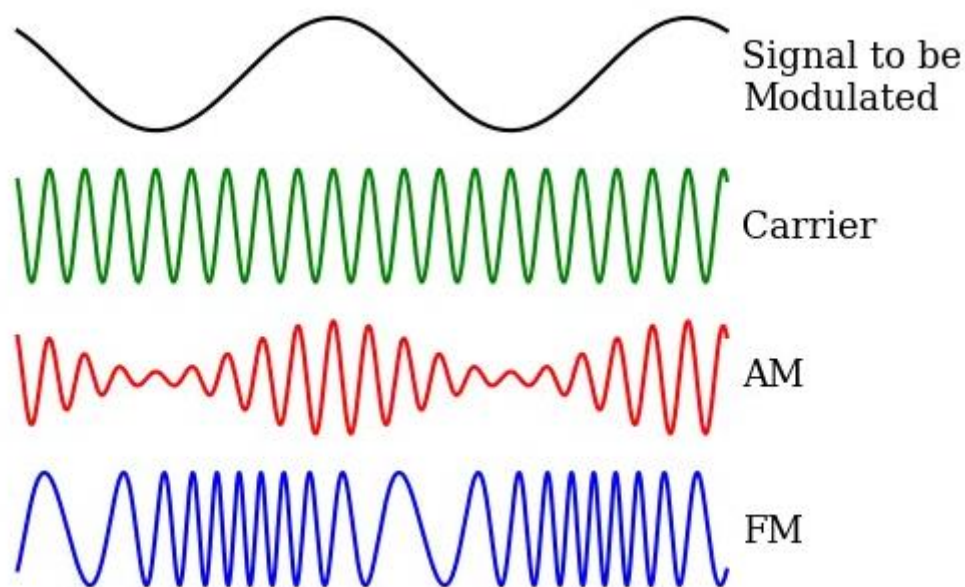


Рисунок 1.1 – АМ та FM в часовій області [1].

Третім загальним типом модуляції сигналів є РМ (phase modulation) – фазова модуляція. В даному типі модуляції сигналів частота та амплітуда не змінні, проте фаза сигналу змінюється, несучи таким чином корисний сигнал.

Дані типи модуляцій сигналів використовуються для аналогових сигналів. Проте в ері цифрової електроніки часто буває необхідність передачі цифрових сигналів. В такому випадку використовуються ті самі принципи модуляції, що були розглянуті, проте з деякими відмінностями, розглянемо основні типи цифрової модуляції сигналів.

ASK (amplitude shift keying) – амплітудна маніпуляція. Маніпуляція – процес впливу на процес, об'єкт чи систему для отримання необхідних результатів. Амплітудна маніпуляція використовує для кодування логічної одиниці більшу амплітуду сигналу, а для логічного нуля меншу амплітуду, якщо говорити про

дворівневу 2ASK, існує також чотирирівнева 4ASK, в якій за допомогою чотирьох рівнів амплітуди кодується 2 інформаційні біти.

На рис.1.2 зображено, 2ASK в часовій області, а на рис.1.3 - 4ASK в часовій області.

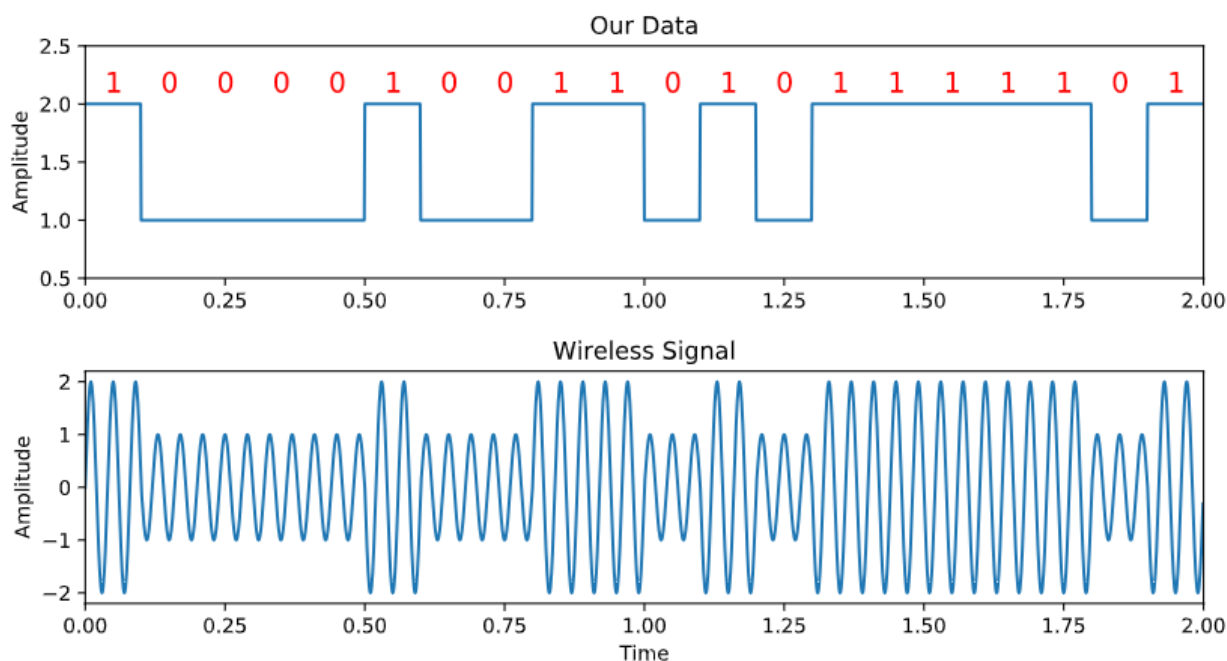


Рисунок 1.2 – Приклад 2ASK модуляції [1].

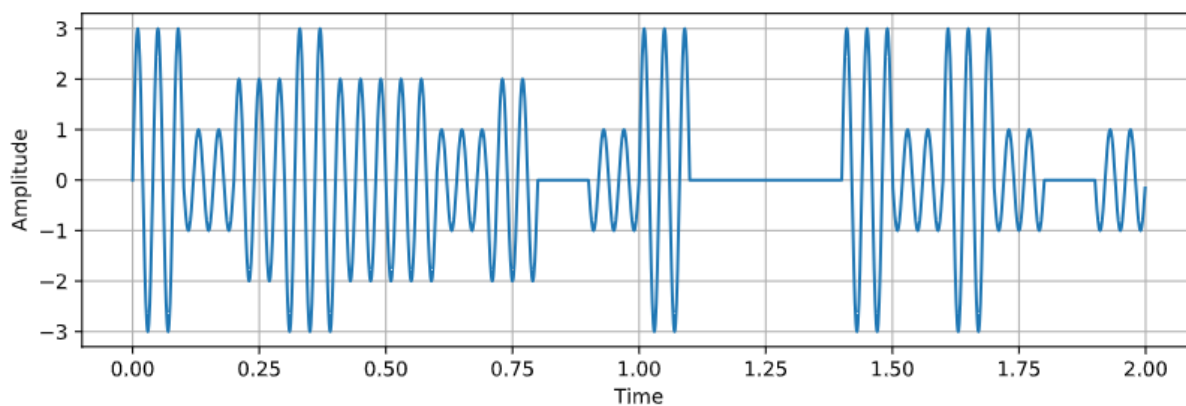


Рисунок 1.3 – Приклад 4ASK модуляції [1].

PSK (phase shift keying) – фазова маніпуляція, кодування сигналу за допомогою зміни фази, також існують різновиди, які відмінні між собою у кількості закодованих інформаційних біт на структурну одиницю. Приклад такої модуляції зображено на рис.1.4, це бінарна фазова маніпуляція - тому додано приставку B, тобто BPSK.

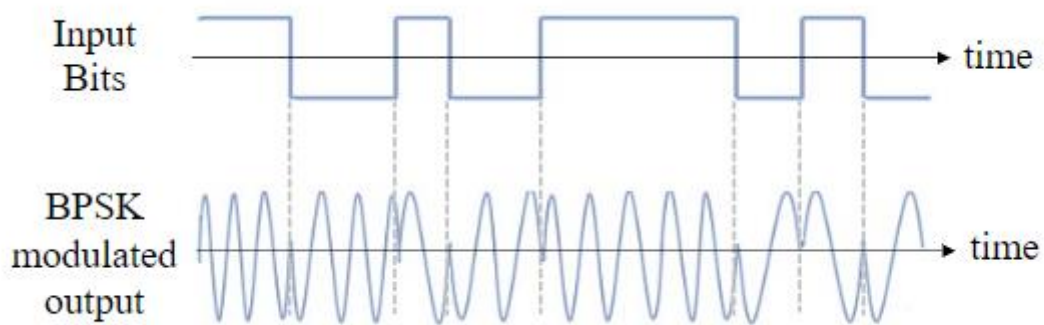


Рисунок 1.4 – Приклад BPSK модуляції [1].

FSK (frequency shift keying) – частотна маніпуляція. Кодування відбувається з використанням зміни частоти. На рис.1.5 приведено приклад такого типу модуляції в часовій області.

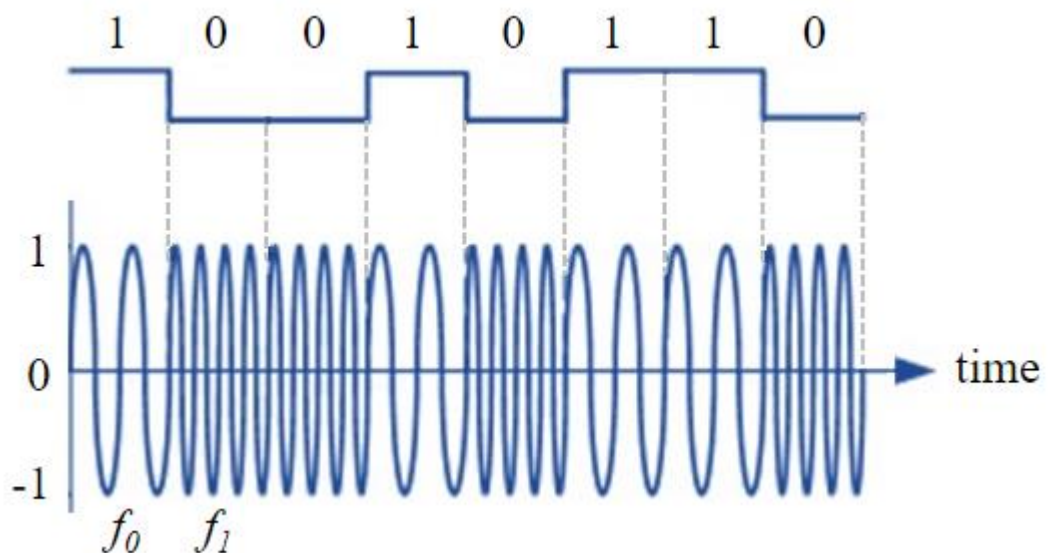


Рисунок 1.5 – Приклад FSK модуляції [1].

1.2 Напрямки використання системи визначення типу модуляції радіосигналів.

Визначення типу модуляції сигналів в більшості випадків цікаве в трьох напрямках: радіозв'язок, радіомоніторинг та в деякій мірі пеленгація.

В радіозв'язку, особливо в універсальних приймачах, потрібно знати тип модуляції сигналу, який необхідно прийняти, для того, щоб використати демодулятор для розшифровки корисного сигналу. В іншому випадку, застосувавши демодулятор для іншого типу модуляції, інформації не отримати, тому слід чітко розуміти, з яким типом модуляції сигнал приходить на приймач.

В радіомоніторингу важливо приймати усі сигнали наявні в ефірі та отримувати з них інформацію, яку вони несуть, для визначення, наприклад, несанкціонованих радіостанцій та інших типів джерел радіосигналів.

Пеленгація це процес, коли ми визначаємо напрямок та відстань до джерела випромінювання, проте іноді нам потрібно ще отримувати інформацію з сигналу випромінювача, за яким ведеться спостереження.

1.3 Основні методи визначення типу модуляції сигналів.

Існують різні методи визначення модуляції сигналів, кожен з них містить свої переваги та недоліки. Є методи автоматичного визначення типу модуляції та методи, які потребують участі оператора. Одним з цих методів є метод визначення типу модуляції використовуючи аналізатор спектру. Використовуючи такий підхід, оператору, який використовує устаткування з таким методом визначення модуляції радіосигналу, доведеться самому вирішувати, який демодулятор застосувати. Це ускладнює використання систем та приладів з таким підходом. Оскільки оператор повинен бути добре обізнаним у сфері теорії сигналів.

Отже, зупиняючись лише на автоматичних методах визначення типу модуляції радіосигналів, де демодулятор вибирається автоматично, розглянемо поширені методи для вирішення даної задачі.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ док.ум.	Підпис	Дата		11

Усі методи автоматичного визначення типу модуляції радіосигналів можна поділити на два типи: традиційні автоматичні методи визначення типу модуляції радіосигналу та методи з використанням штучного інтелекту (ШІ), які в даному описі назовемо прогресивними методами визначення типу модуляції радіосигналу.

1.4 Приклади методів визначення модуляції сигналів та їх аналіз.

Для початку розглянемо основні підходи в традиційних методах. Найбільш поширені традиційні методи: метод з використанням спектральної характеристики, статистичний метод та з використанням перетворень, наприклад, перетворень Фур'є. Усі ці підходи є працюючими, з точністю від 30% в гіршому випадку, до 100% в ідеальному, в залежності від конкретного методу та відношення рівня сигналу до рівня шуму, проте системи, які використовують такі методи, мають проводити велику кількість розрахунків та перевірок і водночас є громіздкими, для того щоб отримати правильний тип модуляції для подальшого вибору демодулятора, в іншому випадку нам знову ж таки потрібен оператор.

Прикладом такої системи є система автоматизованого визначення параметрів сигналу та розпізнання виду модуляції засобами радіомоніторингу в умовах апіорної параметричної невизначеності [2]. Це складна система, яка потребує великої кількості різних підсистем. Основним методом визначення модуляції в цій системі виконується напрямком комулянтного аналізу. Ідея методу полягає в тому що, розраховуються комулянти, різних порядків та порівнюються значеннями, які відомі, оскільки розраховуються теоретично. Перевагами даного методу є відносна точність та ймовірність правильного визначення типу модуляції. До недоліків можна віднести складність розробки та побудови даної системи [2].

На даний час стрімко набирає оберти розвиток та удосконалення штучного інтелекту та нейронних мереж. Такі системи та прилади краще справляються, а також мають простішу та компактнішу архітектуру особливо у порівнянні з традиційними методами вирішення задач, які при побудові складних систем мають громіздку архітектуру, та потрібно використовувати досить багато ресурсів. Для порівняння, система, яка використовує традиційні методи, має в своєму складі

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		12

кілька блоків у вигляді друкованих плат для обробки сигналів, на відміну, нейронна мережа вміщається в FPGA мікросхемі з її обв'язкою. Тому спираючись на ці відомості, зупинимось на рішеннях, які використовують даний тип передових технологій.

Існують різні типи нейронних мереж. Поширеними мережами які використовують для задачі визначення типу модуляції сигналів є: ResNet (Residual neural network) – остаточна нейронна мережа, CNN (Convolutional neural network) – згорткова нейронна мережа, SRCNN (Super-Resolution Convolutional Neural Network) Згорткова нейронна мережа супер роздільності, CLDNN (Compute Library for Deep Neural Networks) – нейронна мережа глибокого комп'ютерного навчання. Також існує рішення з використанням ResNet та LSTM (long short-term memory network) – остаточна мережа з додатковою довготривалою швидкозапам'ятовуючою пам'яттю [3]. Згідно з табл. 1.1, найкращим типом за точністю, для визначення типу модуляції радіосигналу є останній згаданий варіант. За допомогою цього методу є можливість визначення типу модуляції сигналу з точністю не менше 62%. Що є досить непоганим показником як показник найгіршого випадку. В найкращому випадку це 92%, що є дуже хорошим показником.

Таблиця 1.1 – Точність визначення типу модуляції в залежності від SNR (Signal-to-noise ratio) – відношення сигналу до шуму та типу нейронної мережі[3]

SNR, dB	ResNet, % [4]	CNN, % [4]	SRCNN, % [5]	CLDNN, % [6]	ResNet + LSTM, % [3]
-6	61	56	60	54	62
-4	70	71	71	70	75
-2	76	81	80	82	85,4

Таблиця 1.1 - Продовження

SNR, <i>dB</i>	ResNet, % [4]	CNN, % [4]	SRCNN, % [5]	CLDNN, % [6]	ResNet + LSTM, % [3]
0	79	85	86	87	90,1
4	80,5	86,6	89	89,6	91,7
10	81,1	86,8	89,2	89,2	91,8
18	81,4	87,3	89,4	90	92

Для подальшого розгляду зупинимось саме на цьому методі. За допомогою даного методу можна розпізнати 10 видів модуляції радіосигналів: два з яких аналогові типи, решта цифрові типи. На рис.1.6 представлені спектрограми, амплітуда сигналу залежить від кольору, світлий колір - більша амплітуда сигналу, а на рис.1.7 ці види модуляції в часовій області, спектрограми та діаграми в часовій області отримані за допомогою програмного середовища MATLAB [7].

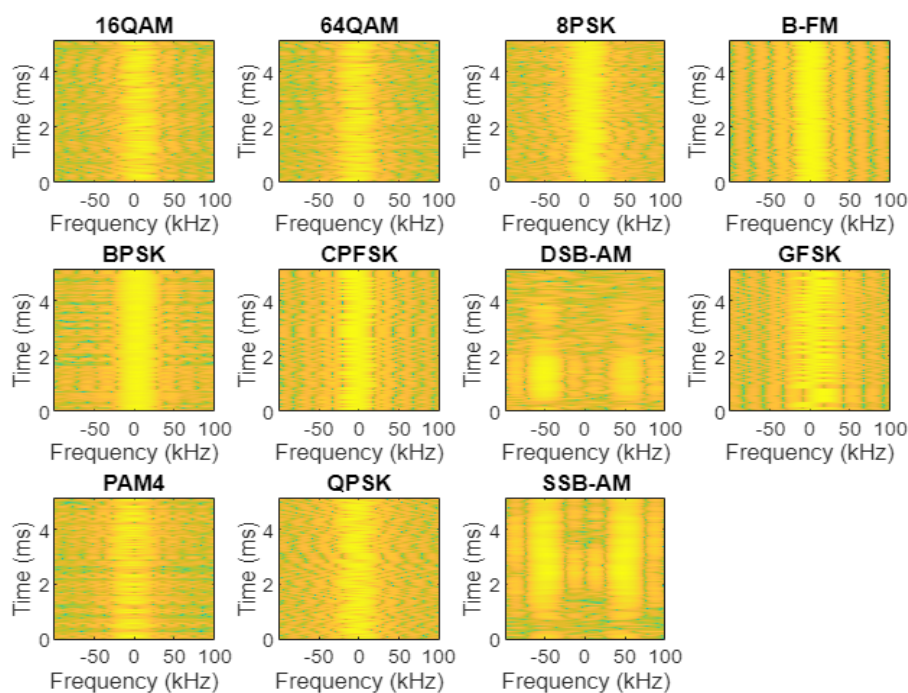


Рисунок 1.6 – Спектрограми різних типів модуляції радіосигналу[7].

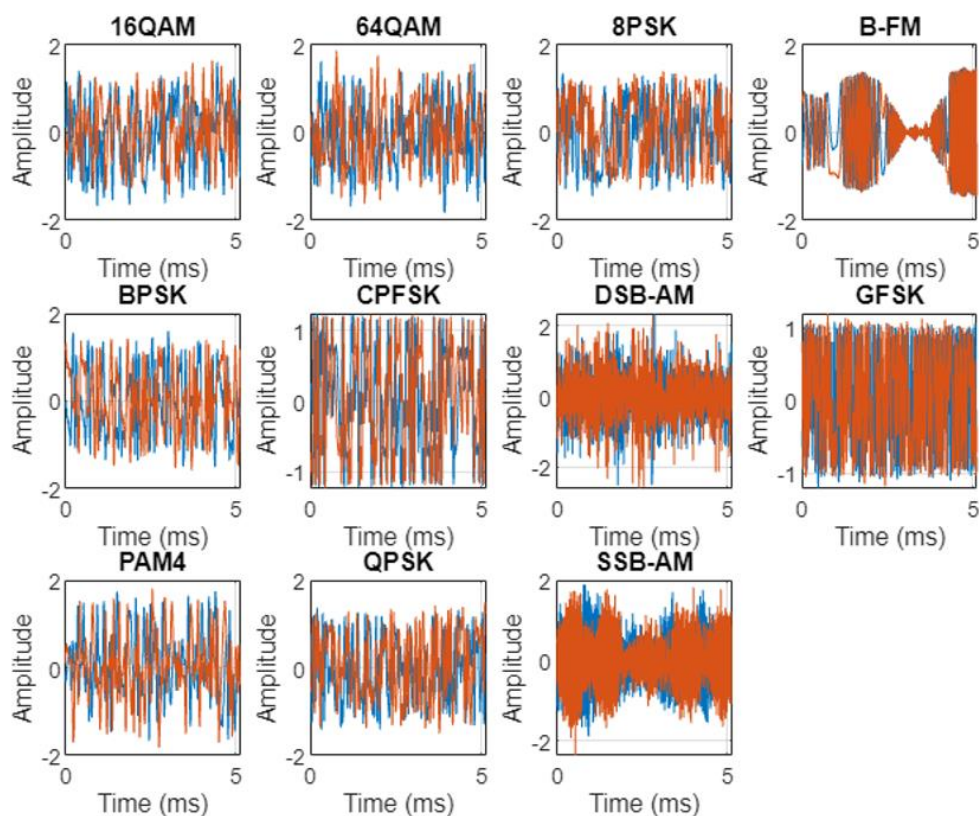


Рисунок 1.7 – Діаграми в часовій області різних типів модуляції радіосигналу[7].

На рис.1.8 зображено залежності точності визначення даного переліку типів модуляції від SNR для методу, що використовує ResNet та LSTM.

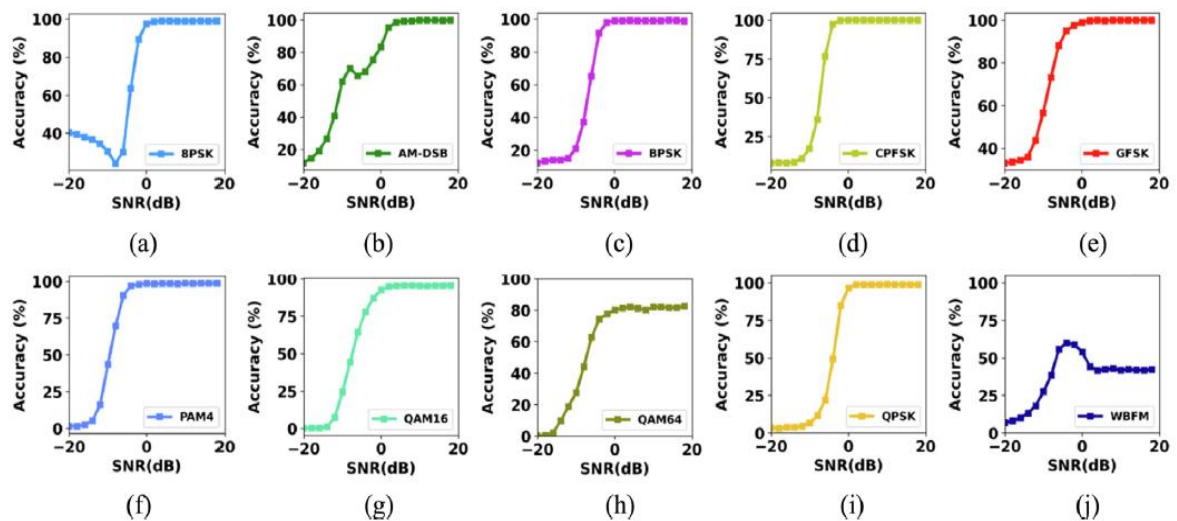


Рисунок 1.8 – Точність класифікації типу модуляції для методу ResNet + LSTM в залежності від SNR для наступних типів модуляції: (a) 8PSK, (b) AM-DSB, (c) PFSK, (d) CPFSK, (e) GFSK, (f) PAM4, (g) QAM16, (h) QAM64, (i) QPSK, (j) WBFM[3].

Ця система побудована з використанням Google Colab – онлайн платформа з використанням мови Python. Мова Python набуває все більшої популярності, а велика кількість фреймворків та відкритих джерел роблять її дуже зручною для різних типів розробки. Проте даний опис системи побудований та досліджений в програмному середовищі, наша ціль - побудувати пристрій, який з використанням даних технологій буде визначити тип модуляції радіосигналу з використанням нейронної мережі.

1.5 Патентний пошук

Розглянемо патент [8] на систему для визначення типу модуляції сигналу з використанням множинного представлення вибірок сигналу. Система вміщує в себе приймач та множину згорткових нейронних мереж (CNN).

Працює наступним чином: комплексний квадратурний вектор представлення сигналу, приходить з приймача сигналу, далі генерується множинне представлення вектору сигналу, для якого відбувається класифікація, в одній з множини паралельних згорткових нейронних мереж і після цього надсилається відповідь про те який тип модуляції присутній в сигналі. Мережі повинні бути натреновані для визначення, за допомогою комплексного квадратурного вектора опорної смуги, типу модуляції сигналів. Повинні також порівнювати квадратурні вектори відомих типів модуляції сигналів, з тими які приходять на вхід.

Даний патент використовує прогресивний метод, тобто використання нейронних мереж. В залежності від типу сигналу та відношення рівня сигналу до рівня шуму, найкращий показник точності визначення складає близько 91% [8].

Патентний пошук показав: що існують реалізації системи для визначення типу модуляції сигналів, які мають показники точності визначення близько 90% для певних типів сигналів.

1.6 Аналіз технічного завдання

Отже, найбільш перспективними та актуальними методами є прогресивні методи визначення типів модуляції з використанням ШІ та нейронних мереж. Оскільки вони показують найвищу точність та мають простішу архітектуру у порівнянні з використанням традиційних методів.

Метою роботи є розробка пристрою для автоматичного визначення типу модуляції з використанням нейронних мереж.

Згідно технічного завдання потрібно розробити пристрій який визначатиме наступні типи модуляції: QPSK, 8PSK, BPSK, QAM16, QAM64 (опціонально).

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		17

Пристрій повинен мати моноблочну конструкцію, а отже повинен бути розміщений на одній друкованій платі. Пристрій повинен працювати самостійно та мати можливість працювати у складі зовнішньої системи, а отже потрібно використовувати поширений інтерфейс. А також потрібне програмне забезпечення для використання пристрою як окремої системи.

Для досягнення мети роботи потрібно вирішити наступні задачі:

- Розробка структурної схеми
- Вибір елементної бази, обґрунтування вибору.
- Розробка схеми електричної принципової ЕЗ, ПЕЗ.
- Розробка алгоритмів, програмного забезпечення, нейронної мережі.
- Розробка друкованої плати або плат.
- Конструкторські та електричні розрахунки ДП.

Висновок до розділу 1.

Отже, визначення типу модуляції сигналу - актуальна задача, яка потребує удосконалення наявних методів та пошуку нових. На даний час найкращими методами для визначення типу модуляції сигналу, є методи, які мають в основі нейронну мережу, такі системи мають більшу точність та простішу апаратну архітектуру, судячи з огляду літератури та наявних рішень.

Сучасні рішення задачі, які використовують у складі нейронну мережу, мають кращі показники точності визначення. Тому напрямок розробки системи для визначення типу модуляції сигналу, буде з використанням нейронної мережі.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		18

Розділ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ

В даному розділі розглядаються принципи проектування схеми електричної принципової та структурної схеми приладу автоматичного визначення типу модуляції сигналів. Також розглянуто основні моменти, на які зверталася увага при проектуванні схеми електричної принципової та схеми структурної пристрою. Додатково розділ вміщує в собі опис та пояснення вибору елементної бази, яка використовується для побудови пристрою. Наведено посадкові місця конструкторських елементів.

2.1 Опис та аналіз схеми електричної структурної

Структурна схема показана на рис.2.1.

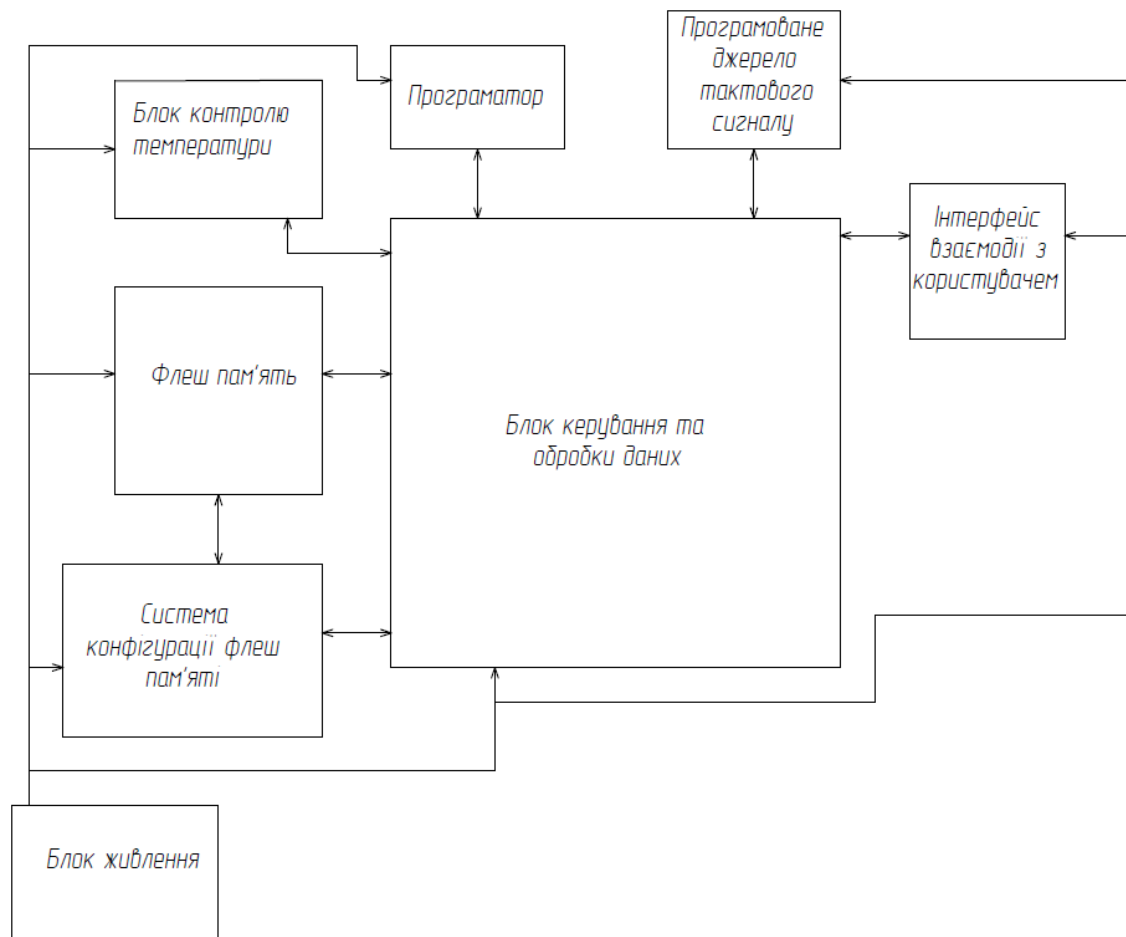


Рисунок 2.1 Структурна схема пристрою

Пристрій складається з наступних структурних блоків:

- блоку обробки даних та керування системою;
- блоку живлення;
- блоку контролю температури;
- блоку флеш пам'яті;
- системи конфігурації флеш пам'яті;
- програматора;
- програмованого джерела тактового сигналу;
- інтерфейсу для взаємодії користувача.

Блок обробки даних та керування системою - це центральне ядро, яке забезпечує контроль усіх периферійних пристроїв системи визначення типу модуляції сигналів, а також в даному блоці розміщена нейронна мережа, яка проводить обчислення та ідентифікацію типу модуляції сигналів. Щодо керування периферією, то даний блок керує усіма інтерфейсами та рештою частин системи, надаючи кожній певні команди для виконання необхідних процесів впродовж обробки даних.

Блок живлення, - це блок, у якому відбувається перетворення та стабілізація напруги живлення кожного блоку. Оскільки різні частини системи використовують для живлення різну напругу, а сам прилад живиться від 12 В, то виникає необхідність розподілення та стабілізації напруги для кожної складової системи. І якраз цим завданням займається блок живлення.

Для забезпечення оптимальної роботи ядра системи потрібно забезпечити оптимальний температурний режим для нього. Цю задачу виконує система контролю температури. Дана система в залежності від температури вмикає або вимикає активне охолодження системи, таким чином забезпечується температурний режим пристрою та запобігається вихід пристрою з ладу саме через перегрів, таким чином за допомогою даної системи збільшується надійність пристрою, а також зменшується витрата енергії, оскільки коли система має

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		20

температуру не перевищену нормі, то система активного охолодження не споживає енергію.

Блок флеш пам'яті необхідний для запису в неї прошивки блоку керування та обробки даних. Оскільки згідно технічного завдання необхідно використовувати FPGA, то для даного типу мікросхем необхідно мати прошивку, згідно якої забезпечується необхідний функціонал роботи FPGA.

Система конфігурації флеш пам'яті необхідна для того, щоб мати можливість записувати прошивку у флеш пам'ять, коли блок керування не має програмної прошивки, і для того щоб виконати конфігурацію. Ця система керує флеш пам'яттю для програмування пристрою відповідно до вимог.

Програматор - це інтерфейс, за допомогою якого записується конфігураційна прошивка у флеш пам'ять для функціонування системи. Також за допомогою цього інтерфейсу є можливість виконувати відлагодження пристрою, спостерігаючи за поведінкою сигналів в пристрої.

Програмоване джерело тактового сигналу - це джерело тактового сигналу з можливістю зовнішнього програмування з використанням двопроводового послідовного інтерфейсу I2C.

Інтерфейсом взаємодії користувача є блок обміну даними для двох випадків: для самостійного використання пристрою та для використання у складі іншої системи. Отже для такої задачі повинен бути поширений стандартний протокол обміну даними, через який можна з легкістю обмінюватися інформацією з системою чи, наприклад, з персональним комп'ютером. Для даного пристрою було вибрано протокол Ethernet 10G стандарту IEEE 802.3[9], який є високошвидкісним протоколом обміну даними, та є поширеним та стандартним. Даним протоколом дані можна передавати з використанням персонального комп'ютера, а також, коли блок системи підключений до зовнішніх пристроїв через 10G мережу.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арх.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		21

2.2 Опис та аналіз схеми електричної принципової

До складу електричної схеми включено наступні частини:

- центральне ядро у вигляді FPGA мікросхеми;
- обв'язка у вигляді струмообмежувальних резисторів та конденсаторів для фільтрування завад живлення;
- периферійні пристрої: пам'ять, системи програмування мікросхеми, роз'єми.

Схемотехнічною особливістю є використання двох мікросхем пам'яті меншої розрядності для побудови пам'яті більшої розрядності. Принцип наступний, адресні шини для обох мікросхем пам'яті спільні, спільні також керуючі сигнали, а от молодші біти шини даних заведені на одну мікросхему пам'яті, старші біти заведені на іншу мікросхему пам'яті, таким чином за допомогою такого схемотехнічного рішення можна розширити розрядність шини даних маючи мікросхеми з меншою розрядністю шини даних. Таким методом можна також розширити діапазон адрес, в такому випадку шина даних спільна, а старші біти адресної шини підключаються до однієї мікросхеми, молодші біти до іншої.

В схемі присутнє автономне джерело живлення у вигляді батареї, яка призначена для постійного живлення окремих частин мікросхеми.

За допомогою вбудованого програматора при навіть невеликій зміні прошивки можна з легкістю перепрошити пристрій, що дозволяє виконувати оновлення пристрою, навіть якщо пристрій вже дійшов до кінцевого споживача, що є позитивною складовою для серійного виробництва.

В схемі присутні чотири канали для передачі та отримання даних, що в свою чергу дозволяє окремо працювати з пристроєм чотирьом системам.

Схема спроектована згідно технічного завдання, відповідає поставленим вимогам та наведена у комплекті конструкторської документації.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		22

2.3 Обґрунтування вибору елементної бази пристрою.

Для правильної роботи пристрою необхідно обрати відповідну елементну базу, це допоможе підтримати правильну функціональність пристрою, забезпечить безвідмовну роботу та допоможе зменшити енергоспоживання пристрою, особливо це актуально, якщо використовувати для живлення пристрою автономні джерела енергії, наприклад акумулятори. Правильна елементна база допоможе спроектувати пристрій з найкращими характеристиками.

2.3.1 Вибір FPGA мікросхеми.

Вибір FPGA мікросхеми виконаємо з використанням матриці параметрів. Для цього виберемо 3 мікросхеми з однаковим функціоналом, різних серій проте однієї лінійки чипів, а саме лінійки Stratix V від Intel. Дана лінійка по своїм характеристикам може використовуватися для досить складних систем. Мікросхеми, між якими відбувся вибір: 5SGXEA7N2F45C2, 5SGSMD4E1H29C1, 5SGXMA7K1F40C2L. В табл. 2.1 наведено порівняльні характеристики мікросхем.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таблиця 2.1 - Основні параметри для порівняння

Серія FPGA мікросхеми	Параметри				
	Кількість логічних комірок	Кількість DSP блоків	Кількість блочної пам'яті, біт	Напруга ядра, В	Кількість виходів
SGXEA	234720	256	52428800	0.9	1064
SGSMD	135840	1044	19599360	0.9	416
SGXMA	234720	256	52428800	0.85	864
Ваговий коэф. b_j	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2

В таблицю додається ваговий коефіцієнт для кожного параметра. Наскільки великий цей коефіцієнт залежить від того, наскільки важливий параметр при виборі даного елементу, найбільш важливим параметрам належить найбільший коефіцієнт b_j . Величина суми вагових коефіцієнтів повинна бути рівна одиниці, згідно формули [11]:

$$\sum_{j=1}^m b_j = 1 \quad (2.1)$$

Ваговий коефіцієнт обрали з наступних міркувань, потрібна мікросхема з досить великою кількістю виходів, оскільки маємо високо розрядні шини даних та адрес, мікросхема повинна використовувати меншу напругу, а отже зменшиться і використана потужність, мікросхема повинна мати досить хороший запас блочної пам'яті для того щоб «натренувати» нейронну мережу, також повинна містити достатню кількість логічних комірок для вміщення усієї логіки нейронної мережі і в тому числі протокол для керування мережевою частиною пристрою.

Згідно таблиці основних параметрів, складаємо матрицю параметрів X:

X=

234720	256	52428800	0.9	1064
135840	1044	19599360	0.9	416
234720	256	52428800	0.85	864

Проаналізуємо параметри матриці X. Перерахуємо параметри, щоб при більшому значенню параметра, була FPGA мікросхема з кращими характеристиками. Параметри, які не відповідають умові, перераховуємо за формулою [11]:

$$Y_{ij} = 1/X_j \quad (2.2)$$

де $i = 1, n$ – кількість обраних IC;

$j = 1, m$ – кількість параметрів IC.

Кращими властивостями мікросхеми є: велика кількість вихідних портів, логічних комірок, DSP блоків та блочної пам'яті, а також низька напруга ядра. Отже матриця параметрів Y має наступний вигляд:

Y =

234720	256	52428800	1,11	1064
135840	1044	19599360	1,11	416
234720	256	52428800	1,17	864

Матрицю Y приводим до матриці нормованих параметрів – A . Нормування виконуємо згідно формули [11]:

$$a_{ij} = \frac{(j^{max}y_{ij}-y_{ij})}{j^{max}y_{ij}} \quad (2.3)$$

де $j^{max}y_{ij}$ - максимальний елемент у стовпці j матриці Y ;

y_{ij} - поточне значення елемента в стовпці j матриці Y .

Матриця нормованих параметрів A має вигляд:

$$A =$$

0	0,75	0	0,05	0
0,42	0	0,62	0,05	0,6
0	0,75	0	0	0,18

Перемножимо елементи матриці згідно коефіцієнтів, матриця A набуває тоді вигляду:

$$A =$$

0	0,075	0	0,01	0
0,084	0	0,124	0,01	0,12
0	0,075	0	0	0,036

Для узагальненого аналізу системи параметрів вводять оціночну функцію - Q_i , яка визначається формулою[11]:

$$Q = \sum_{j=1}^n a_j \quad (2.4)$$

$$Q_{SGXEA}=0 + 0,075 + 0,01 + 0 = 0,076$$

$$Q_{SGSMD}=0,338$$

$$Q_{SGXMA}=0,111$$

Визначивши Q_i для кожної мікросхеми, обираємо ту, яка має найнижчий показник, оскільки саме ця мікросхема найбільше задовольняє нас при виборі згідно необхідних нам параметрів. Отже, зробивши аналіз, найбільше нам підходить мікросхема 5SGXEA7N2F45C2.

Решта мікросхем, які використовуються в проєкті були вибрані аналогічним способом. З ними можна ознайомитись в переліку елементів.

Також при виборі мікросхеми враховується тип корпусу, якщо одна і та ж мікросхема має різний тип корпусу, то найбільша перевага приділяється саме BGA (ball grid array) корпусам, так як це сучасні конструкторські елементи, які мають менші розміри, що дозволяє зменшити в розмірах систему визначення типу модуляції сигналів, а оскільки згідно ТЗ є обмеження щодо розмірів, то важливо їх дотриматись.

2.3.2 Вибір резисторів.

Резистори – конструкторські елементи, за допомогою яких відбувається контроль значень струмів і напруг в електричному колі. Електричні характеристики резистора залежать від способу та матеріалу, з якого виготовлений даний конструкторський елемент, а також його конструкцією.

При виборі типу резистора враховуємо наступні параметри:

- номінальний опір;
- робочу температуру;
- тип резистора;
- максимальну робочу напругу;
- спосіб монтажу;

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ док.	Підпис	Дата		27

- нормований допуск;
- розсіювану потужність.

Для пристрою було вибрано три типи резисторів. Це SMD резистори типорозмірів 0603, 0805 та 1206 з номіналами згідно схеми електричної принципової та з допуском $\pm 5\%$. Вибираємо саме SMD резистори оскільки, їхні розміри набагато менші за вивідні, налагодити серійне виробництво пристроїв з SMD компонентами куди простіше ніж вивідне. В залежності від типорозміру залежить розсіювана потужність, чим більший резистор тим більші струми він може пропустити через себе, тому згідно схеми електричної принципової в місцях, де очікується проходження великого струму, або очікуються імпульси струму необхідно забезпечити достатню розсіювальну спроможність пристрою. Резистори використовуємо керамічні, з діапазоном робочих температур $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +125\text{ }^{\circ}\text{C}$, цей діапазон повністю покриває вимоги технічного завдання. З усіма номіналами резисторів можна ознайомитись в переліку елементів.

2.3.3 Вибір конденсаторів

Конденсатори - конструкторський елемент, який забезпечує можливість накопичувати електричний заряд. Електричні характеристики конденсатора залежать від його конструкції, типу та діелектричних властивостей матеріалів. Важливо при виборі конденсаторів враховувати наступні параметри:

- ємність конденсатора;
- робоча напруга конденсатора;
- точність.
- тип.
- спосіб монтажу.

Згідно схеми електричної принципової та проаналізувавши необхідні нам параметри вибираємо керамічні конденсатори типорозмірів 0603 та 0805. Робоча напруга даного типу конденсаторів 50 В, що повністю задовільняє технічне завдання. Точність 10%. Діапазон робочих температур: від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ док.	Підпис	Дата		28

SMD - тип компонентів, що забезпечує мінімальні розміри та автоматизацію виробництва.

Також на схемі електричній принциповій присутні електролітичні конденсатори. Для зменшення габаритних розмірів вибрали SMD електролітичні конденсатори. Робоча напруга на 25 В. Діапазон робочих температур: від -40 °С до + 105 °С. З усіма номіналами резисторів можна ознайомитись в переліку елементів.

2.3.4 Вибір діодів

Діод — схемний компонент , який в залежності від напрямку через p-р перехід по різному пропускає струм. Електричні параметри діодів характеризуються їх конструкціями та матеріалами, з яких побудовано діод.

Основні параметри, які враховуємо при виборі діодів:

- максимальний прямий струм;
- максимальна зворотна напруга;
- потужність;
- монтаж.

Вибрали діоди PMEG2010ABB та SMT2T3V3A. Струм до 1 А, робоча напруга до 20 В. Параметри даних діодів повністю задовольняють ТЗ і схему електричну принципову. Обрані діоди - SMD компоненти.

2.3.5 Вибір транзистора

Потрібен польовий n-канальний транзистор, з максимальною напругою 20 В. Струм 500 мА. По даним характеристикам підходить транзистор FDV305N. Має хорошу стабільність до змін умов навколишнього середовища, працює в широкому температурному діапазоні, розповсюджений, має невисоку вартість.

2.4 Посадкові місця

Посадочне місце мікросхеми залежить від типу корпусу, який характеризується його габаритними розмірами, числом контактів та розташуванням їх відносно площини основи корпусу. Контакти бувають для поверхневого монтажу, а також для монтажу безпосередньо в плату, тобто штирьові контакти.

					ДК01.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		29

У пристрої використовуються мікросхеми лише поверхневого монтажу, оскільки мікросхеми поверхневого монтажу мають багато переваг перед мікросхемами монтажу в монтажні отвори, однією з причин, що даний тип мікросхем має менші габаритні розміри, як наслідок пристрій на базі таких конструкторських елементів має менший розмір та вагу.

Як приклад, на рис.2.2 зображено посадкове місце мікросхеми 5SGXEA7N2F45C2 в корпусі BGA.

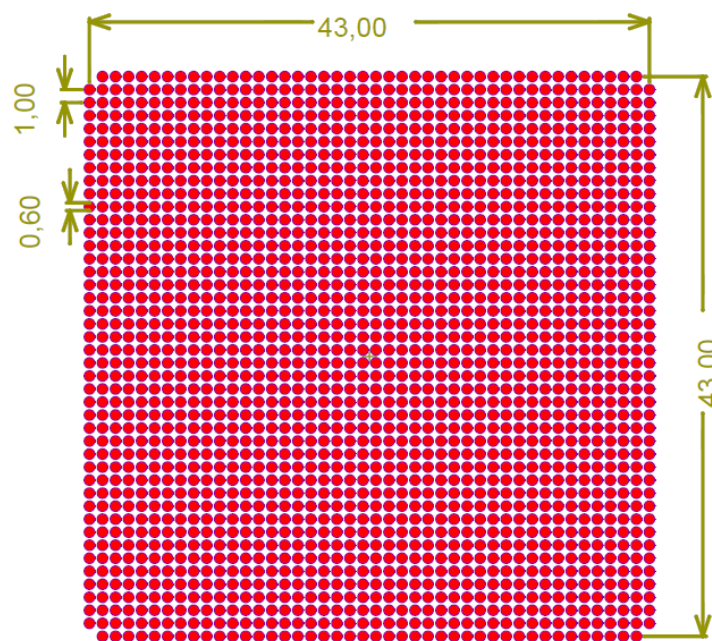


Рисунок 2.2 – Посадкове місце мікросхеми 5SGXEA7N2F45C2 в корпусі BGA

Висновок до розділу 2

Отже, в даному розділі зроблено, описано та проаналізовано схемотехнічну частину проєкту, описано базові принципи. Виконано вибір елементів для системи визначення модуляції сигналів, обрано центральне ядро пристрою, яким є мікросхема 5SGXEA7N2F45C2. При виборі основна перевага для SMD компонентів, як сучасних, компактних, з необхідними параметрами компонентів.

При проєктуванні враховано, що конденсатори повинні бути розміщені біля мікросхем.

					ДК01.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		30

Розділ 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

В даному розділі виконується розгляд конструкторських та технологічних рішень при побудові проєкту. В розділі йдеться: вибір друкованої плати, основні моменти при розробці друкованої плати. Виконуються розрахунки, що підтверджують виконання технічного завдання.

3.1 Вибір друкованої плати

3.1.1 Вибір типу друкованої плати

Друкована плата (ДП) – конструкторський елемент призначений для розміщення на ній конструкторських елементів, та для забезпечення електричного з'єднання між ними. В порівнянні з використанням навісного монтажу, монтаж на ДП має більше переваг, а саме: більша надійність, краща щільність монтажу, повторюваність електричних параметрів та спрощення серійного виробництва.

Друковані плати класифікуються за конструкцією на такі типи: односторонні (одношарові) - ОДП, двосторонні (двошарові) - ДДП, та багатошарові - БДП.

ОДП містять електричні з'єднання лише на одній стороні діелектричної основи. ОДП прості для виготовлення, мають низьку ціну. Мають не високу монтажну та трасувальну спроможність.

ДДП мають можливість нанесення провідних доріжок на обидві сторони основи. На цих платах можливий монтаж штирьових елементів з одного боку та SMD-компонентів з обох сторін, що дозволяє створювати більш складні схеми порівняно з односторонніми платами. Завдяки цьому вони характеризуються високою щільністю монтажу та підвищеною надійністю з'єднань. Такі плати дозволяють оптимізувати розміри та полегшити трасування провідників завдяки щільному розташуванню компонентів. ДДП відзначаються високою механічною міцністю їх кріплення. Завдяки цим властивостям ДДП широко застосовуються в електронній апаратурі.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		31

Багатошарові друковані плати складаються з чергування тонких шарів діелектрика і провідних доріжок. Залежно від технології виготовлення, електричне з'єднання між шарами може бути забезпечено наскрізними перехідними отворами або міжшаровими переходами. У процесі виробництва всі шари з'єднуються в єдину багатошарову основу. Переходи з зовнішніх шарів на внутрішні називаються глухими, а між внутрішніми шарами - прихованими. Ці особливості дозволяють створювати багатошарові плати з високою щільністю компонентів і складними схемами, що є незамінними у сучасній високотехнологічній електроніці.

Згідно схеми електричної принципової та аналізуючи вибрані КЕ, для системи необхідно вибрати БДП. Через велику кількість елементів та зв'язків між ними використання ДДВ та ОДВ не дасть хорошого результату при трасуванні та розміщенні. Також на вибір вплинуло те що використовується мікросхеми у BGA корпусі з великою кількістю виводів, тому через це необхідно використовувати саме БДП.

3.1.2 Вибір матеріалу друкованої плати

Вибір матеріалів, технологічних процесів і елементної бази при розробці сучасних друкованих плат є ключовим фактором, що впливає на їхню продуктивність і надійність, а також на економічну ефективність виробництва. Важливо враховувати наступні аспекти:

- функціональне призначення електронного пристрою: визначення технічних вимог до виробу, очікувана тривалість експлуатації, параметри елементної бази, такі як швидкодія, вихідний опір, рівень сигналів і робоча напруга;
- вимоги до експлуатації та обслуговування: можливість проведення профілактичного обслуговування та ремонту, наявність запасних частин і модулів;
- умови експлуатації та зберігання: врахування впливу навколишнього середовища, сумісність технологічних процесів з наявними виробничими потужностями, рівень механізації та автоматизації виробництва;

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		32

- вибір матеріалів: доступність та вартість основних і допоміжних матеріалів, відповідність спеціальним вимогам.

Для створення друкованих плат використовуються різні матеріали як вітчизняного, так і імпортного виробництва. Матеріали основи для друкованих плат повинні забезпечувати високу електроізоляцію, достатню механічну міцність і стійкість до зовнішніх кліматичних умов. До таких матеріалів належать склотекстоліт, кераміка, фторопластова плівка, сапфір та інші спеціалізовані електротехнічні матеріали.

Таким чином, оптимальний вибір матеріалів та технологічних процесів під час розробки друкованих плат забезпечує високу якість та надійність електронних пристроїв, сприяючи їх ефективному використанню при мінімальних витратах на виробництво.

FR-4 є найбільш поширеним полімерним композиційним матеріалом, використовуваним у виробництві ДДП та БДП. FR-4 належить до класу матеріалів з високою опірністю займання (від FR-1 до FR-5).

Основні особливості та переваги використання FR-4:

- висока адгезія фольги до підкладки: однією з відмінних характеристик FR-4 є висока адгезія фольги до підкладки діелектрика, навіть під впливом високих температур; це забезпечує надійність з'єднань між мідною фольгою та діелектричним матеріалом, що є критичним для стабільної роботи друкованих плат;
- Електричний опір: FR-4 має високий об'ємний та поверхневий електричний опір, що забезпечує надійну ізоляцію між провідниковими доріжками. Це мінімізує ризик коротких замикань та інших електричних збоїв.
- температура склування: цей матеріал характеризується високою температурою склування (T_g), що означає, що він залишається стабільним і не деформується при впливі високих температур;

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.ум.	Підпис	Дата		33

- це особливо важливо під час пайки та інших високотемпературних процесів;
- стабільність геометричних розмірів: FR-4 забезпечує високу стабільність геометричних розмірів, що дозволяє зберігати точність виготовлення друкованих плат навіть під впливом механічних навантажень та температурних змін.
 - механічна міцність: завдяки своїй структурі на основі скловолокна, FR-4 демонструє високу механічну міцність і стійкість до механічних пошкоджень. Це дозволяє використовувати його в умовах інтенсивної експлуатації та механічних навантажень;
 - хімічна стійкість: FR-4 володіє високою стійкістю до хімічних реагентів, що дозволяє його використовувати в умовах агресивного хімічного середовища без втрати своїх властивостей;

Застосування FR-4 дозволяє отримати високоякісні отвори, що є важливим для надійного монтажу елементів в отвори друкованих плат. Завдяки своїм відмінним електричним, механічним та хімічним властивостям, FR-4 широко використовується в різних галузях електронної промисловості, включаючи виробництво комп'ютерних, телекомунікаційних та побутових пристроїв.

Узагальнюючи, FR-4 є незамінним матеріалом для виробництва високоякісних та надійних друкованих плат, що відповідають сучасним вимогам щодо безпеки та продуктивності електронних пристроїв.

Таким чином, для реалізації БДП обраний матеріал FR4-20-35-1,5. Даний матеріал є фольгованим склотекстолітом з підвищеною нагрівостійкістю, товщиною 1,5 мм, який містить у складі 20 провідних шарів.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		34

3.1.3 Метод виготовлення ДП

При виборі методів виготовлення ДП, були розглянуті методи: хімічний субтрактний метод, комбінований позитивний метод, метод попарного пресування друкованих плат, метод пошарового нарощування.

Хімічний субтрактний метод включає видалення зайвого металу з фольгованого діелектрика шляхом хімічного травлення. Процес починається з нанесення фоторезисту, експонування через фотошаблон, проявлення та травлення. Перевагами є простота і дешевизна процесу та можливість досягнення високої точності при належному контролі процесу. До недоліків можна віднести: виникнення бічного підтравлювання, що обмежує роздільну здатність та можливе нерівномірне травлення.

Комбінований позитивний метод, з свого боку, поєднує в собі фотолітографію та гальванічне нарощування. Після формування фоторезистивного шару та його експонування через фотошаблон, на неекспоновані області наноситься мідь. Цей метод має велику перевагу в можливості відтворення різних типів друкованих елементів з високою точністю, а також у захищеності фольгою ізоляції від технологічних розчинів. Проте йому притаманні недоліки, зокрема, велика глибина травлення, обмеження вибору розчинів для травлення та потреба у додаткових капітальних і прямих витратах.

Метод попарного пресування друкованих плат використовується для створення з'єднання між шарами шляхом їх пресування з використанням проміжних шарів. Цей метод має високу щільність монтажу та можливість створення багатошарових плат. Однак, він вимагає складного технологічного процесу та дорогого обладнання, а також може призвести до виникнення дефектів при пресуванні.

Метод пошарового нарощування використовується для виготовлення друкованих плат шляхом послідовного нарощування шарів з нанесенням і затвердінням матеріалів, таких як смоли або полімери. Хоча цей метод забезпечує високу точність і можливість створення складних 3D структур, він має великі

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		35

витрати на матеріали та обладнання, а також тривалість процесу.

Метод металізації наскрізних отворів використовується для створення електричних з'єднань між шарами шляхом осадження металу в наскрізних отворах. Цей метод забезпечує надійні електричні з'єднання, але вимагає складного та дорогого процесу.

Отримавши переваги та недоліки кожного методу і вимоги в ТЗ, будемо використовувати метод попарного пресування друкованих плат у поєднанні з методом металізації наскрізних отворів. Ці методи забезпечують високу щільність монтажу та надійні електричні з'єднання між шарами, що є критично важливим для багатошарових плат. Хоча ці методи є складними і дорогими, вони дозволяють досягти необхідної якості та функціональності для виготовлення 20-шарової друкованої плати.

3.1.4 Вибір класу точності

Точність виготовлення друкованих плат (ДП) визначається комплексом технологічних параметрів, які включають мінімальну ширину провідників, зазори між елементами та інші характеристики. ГОСТ 23571-86 встановлює п'ять класів точності для друкованих плат, проте вибір конкретного класу повинен відбуватися з урахуванням особливостей конкретного виробництва. Намагання вибрати клас точності у зворотному порядку може наробити більше шкоди, ніж користі, і призвести до нереалізованих проєктів.

При проєктуванні і технологічному розрахунку необхідно враховувати граничні значення параметрів друкованих плат з урахуванням похибок їх виготовлення. Такі значення та похибки наведені в табл.3.1 та табл.3.2, що допомагають у виборі оптимальних параметрів для конкретного проєкту. Скорочення які використовуються описані в переліку скорочень.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		36

Таблиця 3.1 - Граничні значення основних параметрів
посадкових місць [11]

Параметер	Позначення	Клас точності			
		2	3	4	5
Ширина друкованого провідника, мм	$b_{пр}^r$	0,45	0,25	0,15	0,10
Відстань між елементами друкованого монтажу, мм	l^r	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантований поясок, мм	$b_{по}$	0,20	0,10	0,05	0,03
Відношення номінального діаметру найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати, мм	$K_{дт}$	0,40	0,33	0,25	0,20

Таблиця 3.2 - Допустимі похибки виконання елементів
посадкових місць [11]

Похибка	Обозначення	Максимальне значення, мм
Зміщення провідників відносно ліній КО	$\delta_{сп}$	0,05
Розташування отворів (всіх) відносно вузлу КО	δ_o	0,07
Розташування КМ відносно вузлу КО	$\delta_{км}$	0.015(0.05)
Фотокопії та фотошаблону	$\delta_{фф}$	0,06
Розташування КМ відносно вузлу КО на фотошаблоні	$\delta_{фш}$	0,05

Виготовлення друкованих плат п'ятого класу точності потребує використання спеціалізованого високоточного обладнання, використання дорогих матеріалів і може вимагати створення "чистої зони" у виробничих приміщеннях. Такі вимоги можуть бути важкими для виконання для багатьох виробництв.

Друковані плати четвертого класу точності виготовляються на високоточному обладнанні, але вимоги до матеріалів, обладнання та приміщень менші, ніж для п'ятого класу.

ДП третього класу є найбільш поширеними, оскільки забезпечують високу щільність трасування і монтажу, при цьому вимоги до устаткування менші.

Друковані плати другого і першого класів виробляються на різноманітному обладнанні, іноді навіть на неспеціалізованому, і використовуються для недорогих пристроїв з меншою щільністю монтажу.

Для проєкту вибрано 5 клас точності оскільки вимоги до точності, надійності та стабільності пристрою є надзвичайно високими. Однією з ключових причин вибору п'ятого класу точності є застосування компонентів цього класу. Компоненти п'ятого класу точності відрізняються надзвичайною якістю та точністю виготовлення, що робить їх ідеальним вибором для проєкту, де вимоги до надійності та стабільності пристрою є критичними. Це особливо важливо для забезпечення стабільної та ефективної роботи пристрою в різних умовах експлуатації, а також для досягнення високої надійності та довговічності його роботи. Вибір п'ятого класу точності також відповідає вимогам технічного завдання, яке передбачає використання найвищого рівня точності для досягнення необхідної функціональності та параметрів пристрою.

3.2 Конструкторсько-технологічні розрахунки

3.2.1 Розрахунок маси пристрою

Маса пристрою — важливий параметр, який впливає на мобільність, енергоефективність, виробничі витрати, ергономіку, надійність та безпеку, а також на транспортні витрати. Легкі пристрої зручніше переносити і використовувати в польових умовах, що важливо для портативних комп'ютерів, смартфонів та інших гаджетів. Вони також можуть бути енергоефективнішими, що особливо важливо для транспортних засобів. Водночас, використання легких матеріалів може збільшити вартість виробництва. Легкі пристрої зручніше тримати в руках тривалий час, що важливо для ручних інструментів та мобільних телефонів. Однак іноді більша маса забезпечує кращу стійкість і надійність, як у випадку з лабораторним обладнанням чи промисловими машинами. Маса пристрою також впливає на транспортування, оскільки важкі пристрої складніше транспортувати, що може підвищити логістичні витрати.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Ар</i>	<i>№ док-м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		38

Маса пристрою визначається сумою усіх конструкторських елементів. Маса пристрою для даної системи склала в 455 г, що задовольняє ТЗ. Найбільш важким елементом системи, є система охолодження з алюмінієвим радіатором, вага системи охолодження складає 250 г, 55% від загальної маси приладу.

3.2.2 Розрахунок надійності

Надійність друкованої плати (ДП) залежить від надійності всіх компонентів, які на ній встановлені, самої плати та якості пайки. Відмова одного або кількох компонентів може призвести до відмови всієї електронної обчислювальної апаратури (ЕОА). Тому час напрацювання до відмови є найбільш точною кількісною мірою надійності кожного конструктивного елемента. Для повної оцінки надійності необхідно знати функцію розподілу часу безвідмовної роботи $f(t)$ та інтенсивність відмов $\lambda(t)$. Маючи ці залежності, можна визначити ймовірність відмови та середній час безвідмовної роботи.

Інтенсивність відмов електронних компонентів визначається експериментально і залежить від багатьох факторів, таких як температура, теплові удари, вологість, режим роботи тощо. Для розрахунку інтенсивності відмов елемента використовуватимемо базову інтенсивність відмов λ_0 , яка визначена для нормальних умов. Це значення є експериментальним і наведено у довідниках для різних елементів, тому скористаємося даними з джерела [11]. Крім того, слід врахувати режим роботи елементів, температурний режим та зовнішні впливи. Для цього застосовуватимемо коефіцієнт навантаження K_n , поправочний коефіцієнт температурного режиму α_t та коефіцієнт зовнішніх впливів α_e . Останні два є довідниковими значеннями, тому значення для α_t та α_e братимемо з джерела [11].

Оскільки коефіцієнт навантаження не є довідниковим значенням, його розраховуємо для кожного типу конструктивних елементів окремо. Він визначається як відношення навантаження в робочому режимі до номінального навантаження.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		39

Для визначення коефіцієнта навантаження резисторів враховуються їхні номінальний опір та потужність, що розсіюється. Оскільки струм, що протікає через резистор, обернено пропорційний його опорю (з меншим опором протікає більший струм), то для розрахунків береться резистор з найменшим опором як найгірший випадок. Це дозволяє створити запас по надійності в конструкторських розрахунках, навіть якщо це призводить до гірших показників в загальному.

Отже:

$$K_{HR} = \frac{U^2}{R * P_{ном}} = \frac{12^2}{1000 * 0,25} = 0,576$$

де: $R = 1$ кОм (найменший з опорів серед резисторів потужністю 0,25 Вт),

$P_{ном} = 0,25$ Вт – номінальна потужність,

$U = 12$ В – напруга живлення (максимально можлива на елементі).

Конденсатори. Для конденсаторів коефіцієнт навантаження визначається по напрузі. Розраховуємо для найгіршого випадку для керамічних конденсаторів:

$$K_{HC} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} = \frac{12}{50} = 0,24$$

де: $U_{роб} = 12$ В – напруга живлення (максимально можлива на елементі),

$U_{ном} = 50$ В – номінальна напруга пробою конденсатора.

Для електrolітичного:

$$K_{HC} = \frac{U_{роб}}{U_{ном}} = \frac{12}{25} = 0,48$$

де: $U_{роб} = 12$ В – напруга живлення (максимально можлива на елементі),

$U_{ном} = 25$ В – номінальна напруга пробою конденсатора.

Для діодів: в нашому випадку розраховуватимемо K_H для діодів за струмом, оскільки струми, за яких працюють ці елементи, значно ближчі до максимальних значень ($I_{роб}=100$ мА, $I_{ном}=1000$ мА), ніж у випадку напруги,

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		40

тому вибираємо гірший випадок:

$$K_{\text{нД}} = \frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{100}{1000} = 0,1$$

Транзистори: в нашому випадку максимальний струм через транзистори в схемі буде рівний 100 мА, а номінальний струм транзисторів 500 мА. Визначаємо $K_{\text{н}}$ через струми:

$$K_{\text{нТ}} = \frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{100}{500} = 0,2$$

Мікросхеми: вибираємо $K_{\text{н}}$ рівний 1, оскільки мікросхеми були вибрані такими, щоб забезпечувати повне функціонування схеми, припускаючи, що всі мікросхеми працюють у відповідних режимах при струмах та напругах, що забезпечують стабільне функціонування їх протягом довгого часу як гарантує datasheet на кожному з мікросхем.

Решта елементів: для усіх інших елементів вибираємо $K_{\text{н}} = 1$. Інтенсивність відмов друкованої плати визначатимемо як інтенсивність відмов металізованих отворів.

Дані для розрахунку часу напрацювання до першої відмови занесені до табл.3.3
Кліматичне виконання приладу: використання в сухих не опалюваних приміщеннях, з природньою вентиляцією, що диктує максимальну температуру роботи в +40 °С. Спираючись на цю інформацію обираємо α_t . Вибираємо $\alpha_e = 10$. [11].

В табл.3.3:

α_e – поправочний коефіцієнт на вплив зовнішніх впливів ;

α_t - поправочний температурний коефіцієнт;

$K_{\text{н}}$ – коефіцієнт навантаження;

N – кількість;

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		41

λ_{0e} – інтенсивність відмови окремих компонентів

Показники інтенсивності відмов, що наведені в таблиці, дещо завищені, дозволяє виконати розрахунок для «найгіршого випадку».

Результуюча інтенсивність відмов дорівнює сумі інтенсивності відмов компонентів визначається за формулою (3.1):

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} \quad (3.1)$$

Компонент	N	$\lambda_{0e} * 10^{-6}, \text{год}^{-1}$	K_H	α_t	α_e	$N\lambda_{0e} * \text{год}^{-1} K_H \alpha_t \alpha_e 10^{-6}$
Керамічні конденсатори	209	0,03	0,24	0,4	10	6,01
Електролітичні конденсатори	35	0,2	0,48	0,2	10	6,72
Резистори	112	0,05	0,576	0,2	10	6,45
Діоди	15	0,03	0,1	0,9	10	0,405
Транзистори	1	0,05	0,2	0,9	10	0,09
Котушки індуктивності	10	0,05	1	1	10	5
Кварцеві резонатори	5	0,05	1	1	10	2,5
Батареї	1	0,9	1	1	10	9
Мікросхеми	29	0,03	1	1,2	10	10,44
Друкована плата(мет. отвори	1426	0,00002	1	1	10	0,28
Контакти роз'ємів	114	0,02	1	1	10	22,8
Пайка виводу	3689	0,00008	1	1	10	2,95
Друкована плата	1	1	1	1	10	10
Сумарна інтенсивність відмов ДВ						82,64

Таблиця 3.3 - Дані для розрахунку часу напрацювання до першої відмови

Сумарна інтенсивність відмов друкованого вузла:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_{pi} = 82,64 * 10^{-6} \text{год}^{-1}$$

Середній час напрацювання до першої відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{82,64 * 10^{-6}} = 12\,100 \text{ (год)}$$

Ймовірність безвідмовної роботи протягом року:

$$P_{річн}(t) = e^{-\lambda_p t} = e^{-82,64 * 10^{-6} * 8760} \approx 0,48$$

Ймовірність відмов протягом року:

$$Q_{річн} = 1 - P_{річн}(t) = 1 - 0,48 = 0,52$$

Графіки ймовірностей відмов і безвідмовної роботи протягом експлуатації наведені на Рис.3.1

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		43

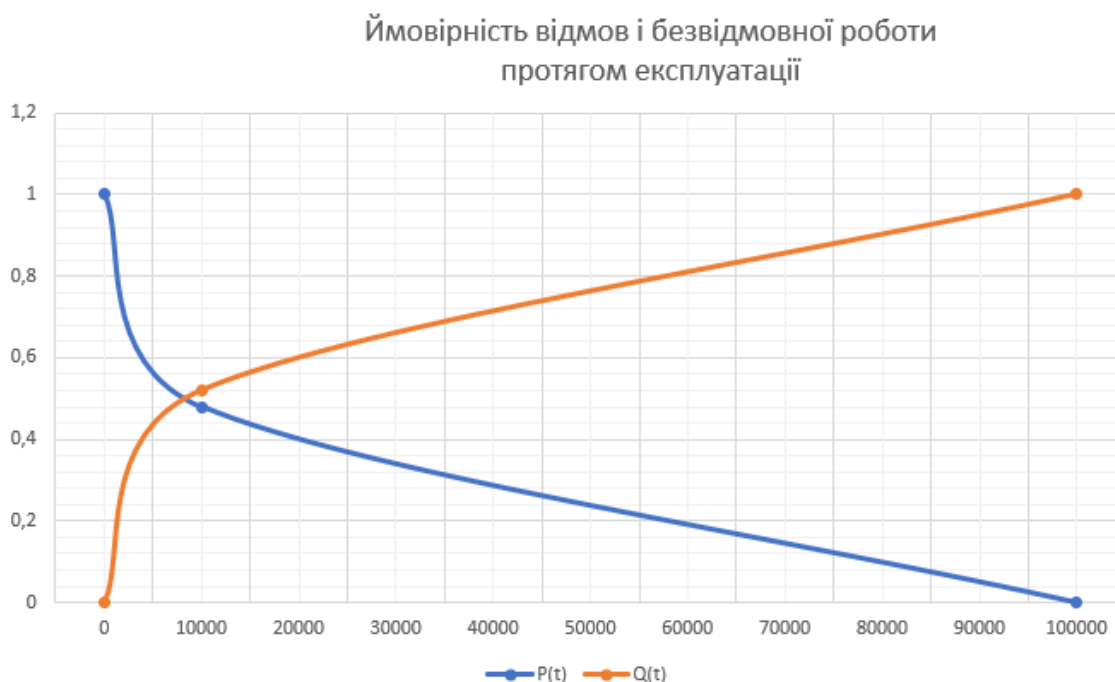


Рисунок 3.1 – Ймовірність відмов і безвідмовної роботи протягом експлуатації

3.3 Електричний розрахунок пристрою

Зі зменшенням розмірів елементів і збільшенням їх щільності на друкованих платах виникають паразитні ємнісні та індуктивні зв'язки між сигнальними провідниками. Це призводить до завад, що можуть спричиняти помилкові спрацьовування елементів. Паразитні реактивності, такі як індуктивності виводів і довгих доріжок, та ємності між контактними майданчиками і землею, впливають на роботу схеми, спричиняючи затримки включення. Для мінімізації завад необхідно виконати електричний розрахунок друкованої плати.

3.3.1 Визначення падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику

Падіння напруги на друкованому провіднику визначається[11]:

$$U_{\text{пад}} = \frac{\rho \cdot I_{\text{max}} \cdot l_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}} \quad (3.2)$$

де ρ – питомий об'ємний опір комбінованого позитивного методу виготовлення ДП, $\rho=0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

$b_{\text{пр}}$ – ширина мідного провідного покриття ДП, $b_{\text{пр}}=0,035$ мм

$l_{\text{пр}}$ - максимальна довжина друкованого провідника, $l_{\text{пр}} = 0,4$ м

$t_{\text{пр}}$ - товщина провідника, $t_{\text{пр}}= 0,0965$ мм

I_{max} – максимальний струм у провіднику (розраховується як сума струмів всіх активних елементів, $I_{\text{max}} = 0,1686$ А

$$U_{\text{пад}} = \frac{p \cdot I_{\text{max}} \cdot l_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}}} = \frac{0,0175 \cdot 0,1686 \cdot 0,4}{0,035 \cdot 0,0965} = 0,35 \text{ (В)}$$

Розраховане падіння напруги не перевищує 5% від напруги живлення ($U_{\text{ж}}=12\text{В}$).

3.3.2 Визначення потужності втрат друкованої плати

Потужність втрат визначається[11]:

$$P_{\text{пот}} = 2 * \pi * f * C * E_n^2 * tg\sigma, \quad (3.3)$$

де f - максимальна частота на якій працює пристрій, $f = 100$ МГц

$tg\sigma$ – тангенс кута діелектричних втрат для матеріалу друкованої плати,
 $tg\sigma = 0,002$ для матеріалу FR4

C - ємність друкованої плати [11]

$$C = \frac{0,009 * \epsilon * S_m}{h} \quad (3.4)$$

де ϵ - діелектрична проникність, $\epsilon=4,5$ для FR4

S_m - площа металізації, $S_m = 4652,5$ мм²

h - товщина друкованої плати, $h=1,5$ мм

$$C = \frac{0,009 * \epsilon * S_m}{h} = \frac{0,009 * 4,5 * 4652,5}{1,5} = 125 \text{ нФ}$$

$$P_{\text{пот}} = 2 * \pi * f * C * E_n^2 * tg\sigma = 2 * 3,14 * 100 * 125 * 25 * 0,002 = 3,925 \text{ (мВт)}$$

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		45

3.3.3 Визначення ємності між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні друкованої плати і мають однакову ширину

Формула для визначення[11]:

$$C = 0,12 * \varepsilon * l_{\text{пр}} * \left[\lg \frac{2*S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right]^{-1} \quad (3.5)$$

де S – відстань між двома паралельними провідниками, мм

$b_{\text{пр}}$ - ширина друкованого провідника, мм

$t_{\text{пр}}$ - товщина друкованого провідника, мм

$l_{\text{пр}}$ - довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, мм

$$C = 0,12 * \varepsilon * l_{\text{пр}} * \left[\lg \frac{2*S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right]^{-1} = 0,12 * 4,5 * 20 * \left[\lg \frac{2*1}{0,4+0,096} \right]^{-1} = 7,75 \text{ (пФ)}$$

3.3.4 Визначення взаємної індуктивності двох паралельних провідників однакової довжини

Формула для визначення[11]:

$$M = 0,02 \left(l_{\text{пр}} \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}} \right) \quad (3.6)$$

де $l_{\text{пр}}$ - довжина перекриття паралельних провідників, см

L_0 - відстань між осьовими лініями двох паралельних провідників, см

$$\begin{aligned} M &= 0,02 \left(l_{\text{пр}} \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 - L_0^2} + l_{\text{пр}} \right) = \\ &= 0,02 \left(4 * \lg \frac{\sqrt{16 - 0,0165} + 4}{0,125} - \sqrt{16 - 0,0165} + 4 \right) = 0,17 \text{ (нГн)} \end{aligned}$$

3.4 Проєктування друкованої плати пристрою

Для проєктування ДП пристрою було обрано систему автоматизованого проєктування Altium Designer. Дане ПЗ є сучасною системою для розробки друкованих вузлів. В складі містить усі необхідні інструменти для розробки. Використання даного ПЗ має суттєві переваги над проєктування в інших середовищах:

- система розроблена спеціально для розробки ДП;
- має потужний набір інструментів які дозволяю не лише проєктувати, а також автоматично обчислювати основні параметри;
- дозволяє працювати з великою кількістю шарів;
- дозволяє автоматизовано отримувати конструкторську документацію та ін.

З недоліків САПР це велика ціна за програмний продукт, проте Altium Designer надає безкоштовні студентські версії що дає змогу спробувати цей потужний інструмент.

На рис.3.2 зображено 3D модель ДП з розташованими елементами на ній, яка спроектована в Altium Designer. На зображенні встановлена система охолодження, проте встановлювати її буде користувач.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		47

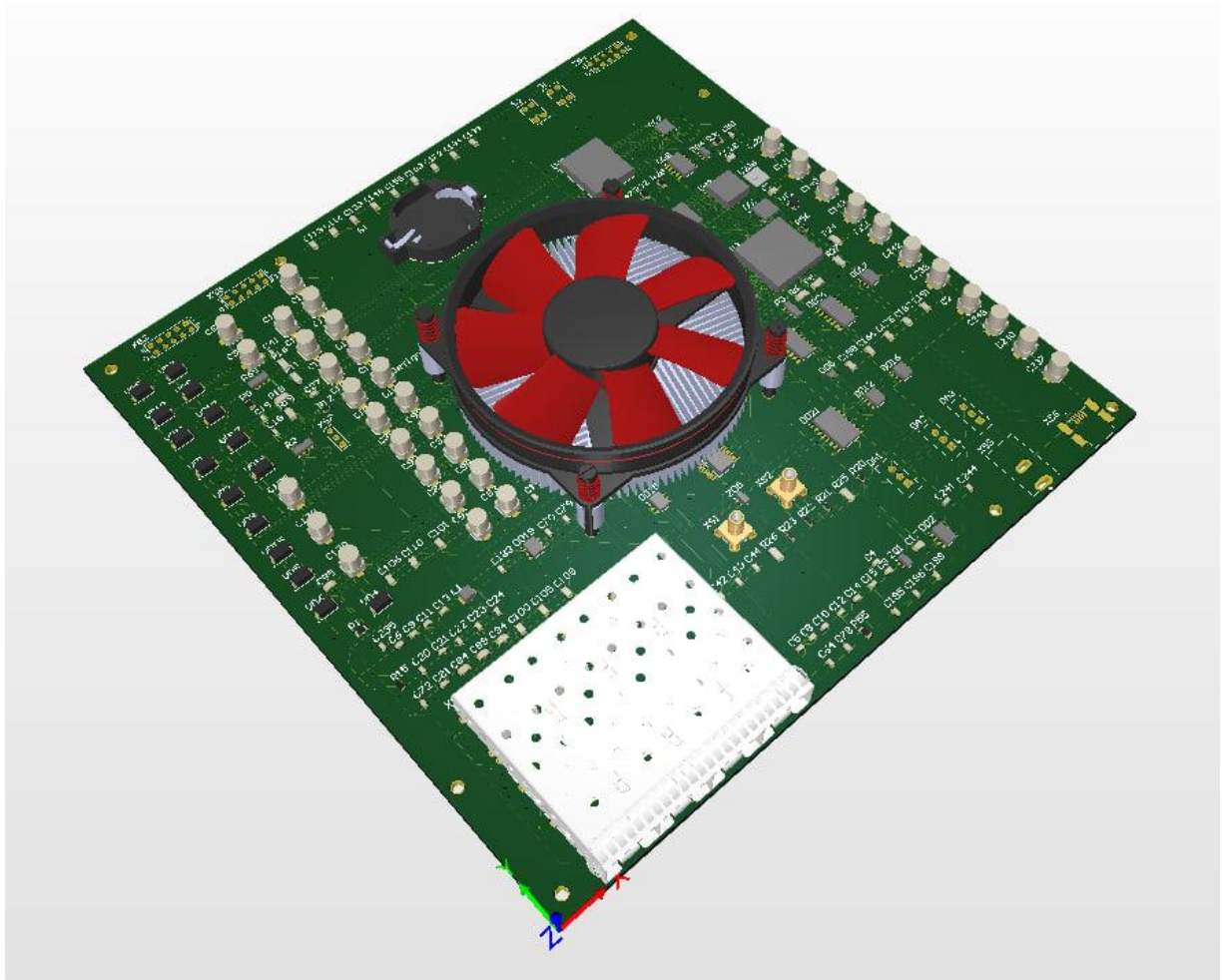


Рисунок 3.2 – 3D модель друкованої плати

Висновок до розділу 3.

Отже, в даному розділі обґрунтовано вибір друкованої плати. Для проєкту обрали 20-шарову друковану плату. Матеріал друкованої плати FR-4, 5 клас точності. Друкована плата має бути виготовлена методом попарного пресування друкованих плат у поєднанні з методом металізації наскрізних отворів.

Розраховано що загальна маса пристрою складає 455 г, що відповідає вимогам ТЗ.

Середній час напрацювання до першої відмови дорівнює 12 100 год, що відповідає вимогам ТЗ, проте цей показник потребує покращення, для довшої експлуатації системи, яка використовує досить дорогі методи при виготовленні, а також дорогі комплектуючі.

					ДК01.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.ум.	Підпис	Дата		48

Виконали електричний розрахунок друкованої плати. Він враховує фактори, пов'язані з реальною конструкцією.

Отримані значення паразитної ємності ($C = 7,75$ пФ) і взаємної індуктивності ($M = 0,17$ нГн) дозволяють стверджувати, що на працездатність схеми вони не впливають.

Оскільки, кліматичне виконання: використання в сухих не опалюваних приміщеннях, з природньою вентиляцією, важливо забезпечити захист від збору вологи у вигляді конденсату, для цього друковану плату необхідно покрити лаком.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		49

Розділ 4. ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У даному розділі описується процес створення програмного забезпечення для пристрою, включаючи визначення вимог, вибір необхідних інструментів, налаштування середовища розробки, відлагодження та ключові аспекти при проєктуванні. Зосереджено на важливості забезпечення відповідності програмного забезпечення вимогам проєкту.

4.1 Вибір програмного забезпечення для розробки

В проєкті використовується FPGA мікросхема від Intel, тому для виконання проєкту використовується Quartus. Це програмний інструмент від Intel для проєктування цифрових схем і програмування FPGA. Він підтримує мови опису апаратури VHDL і Verilog, включає інструменти для оптимізації проєктів, функціонального моделювання, синтезу і розміщення логічних елементів в FPGA, а також має вбудовані засоби аналізу та верифікації. Зручний графічний інтерфейс і підтримка модульного дизайну спрощують розробку та налагодження проєктів. Quartus підтримує різноманітні серії FPGA від Intel/Altera, що робить його важливим інструментом для інженерів і розробників цифрових систем. На рис.4.1 зображено вікно програмного середовища Quartus prime 21.1.

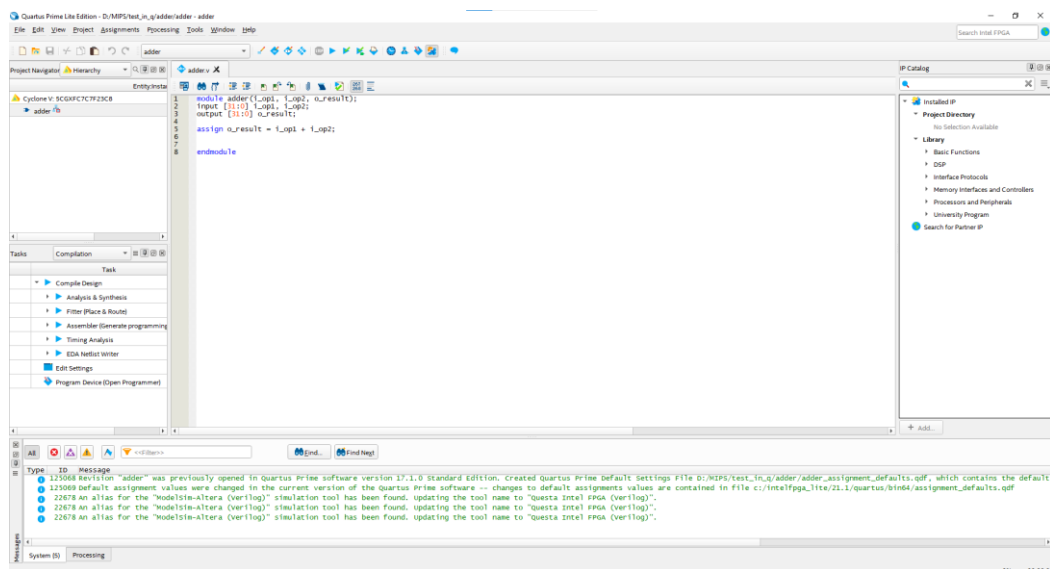


Рисунок 4.1 – Вікно програмного середовища Quartus prime 21.1.

Також для розробки було обрано мову програмування python для розробки та генерації нейронної мережі. Мова python - високорівнева мова програмування, що є досить простою та дозволяє створювати програмне забезпечення швидше. В мові існують бібліотеки, які дозволяють зробити розробку ще швидшою.

В проєкті використовуються наступні бібліотеки мови python:

- tensorflow[12] - для роботи з нейронними мережами;
- pandas[13], numpy[14] – для роботи з даними;
- scikit-learn[15] – для тренування нейромережі;
- matplotlib[16],pyqt5[17] – для побудови графіків;
- hls4ml[18] – для генерації C коду з python коду, для подальшої генерації

Verilog коду нейронної мережі за допомогою Intel HLS.

В проєкті до етапу генерації Verilog коду, застосовується операційна система Linux, а саме WSL (windows subsystem for linux) операційна система linux запущена з windows. Вікно WSL зображено на рис.4.2.

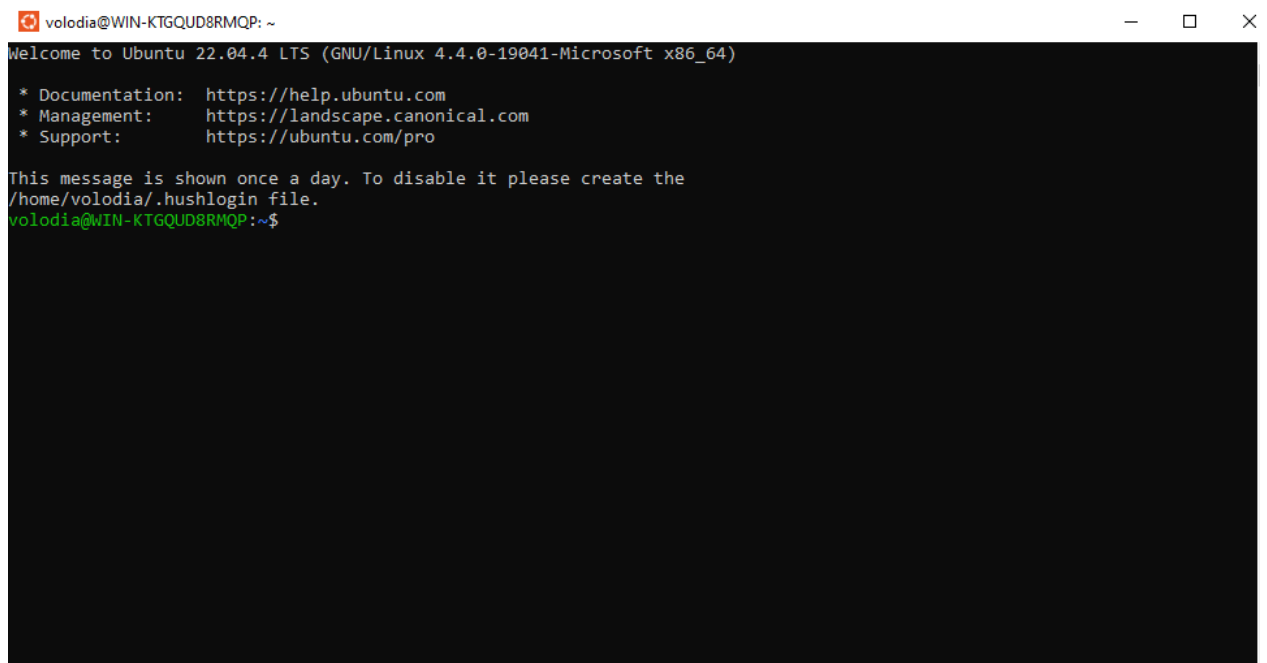


Рисунок 4.2 – Командне вікно WSL.

4.2 Загальна структура програмного забезпечення

Все програмне забезпечення, можна поділити на дві частини: мережевий стек, який забезпечує обмін інформацією та ядро нейронної мережі, яке виконує класифікацію. Особливість даного програмного забезпечення полягає в тому, мережевий стек, можна замінити на будь який інший інтерфейс взаємодії між користувачем, що дозволяє використати програмне забезпечення ядра нейронної мережі, як складову інших систем.

4.3 Програмне забезпечення мережевої частини

В якості програмного забезпечення для мережевої частини було обрано готове рішення відомого розробника [19]. В його проєкті розроблено мережеві рішення для різних типів відлагоджувальних плат. Оскільки, за зразок для свого проєкту ми використовували плату DE5-net, тому як зразок використовуємо цей приклад. В загальному рішенні це - echo сервер, тобто ті дані, які ми надсилаємо, ті отримуємо назад. Для цього використовується команда «netcat».

4.4 Розробка нейронної мережі

4.4.1 Генерація зразків

Для генерації файлів з ід відліками застосуємо python скрипт. Скрипт знаходиться в додатку Б. Даний скрипт дозволяє візуалізувати результати. На рис.4.3 зображені характеристики BPSK сигналу, на рис.4.4 зображені характеристики QPSK сигналу, на рис.4.5 зображені характеристики 8PSK сигналу, на рис.4.6 зображені характеристики 16QAM сигналу, на рис.4.7 зображені характеристики 64QAM сигналу, згенеровані даним скриптом, характеристика сигналів: амплітуда 0.5 В, частота 0.1 МГц, SNR = 0.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		52

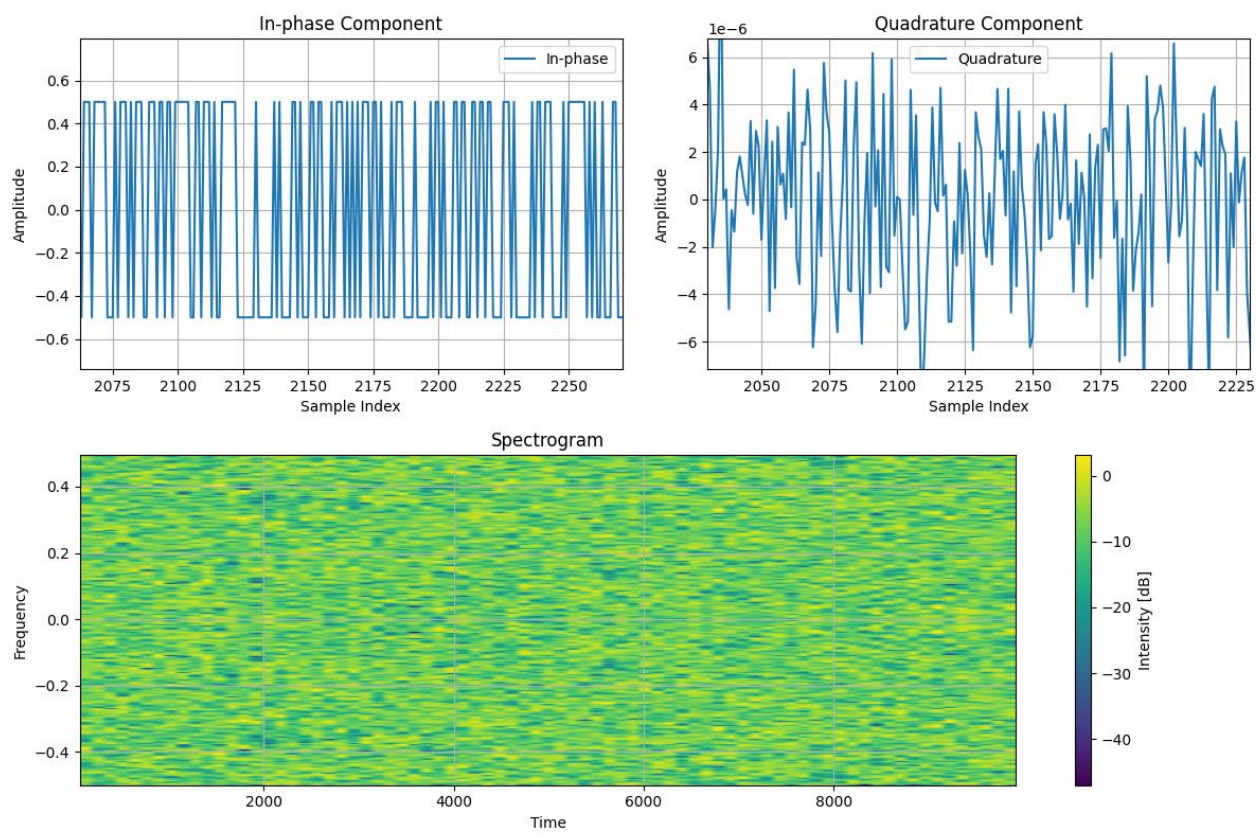


Рисунок 4.3 – Характеристики BPSK сигналу

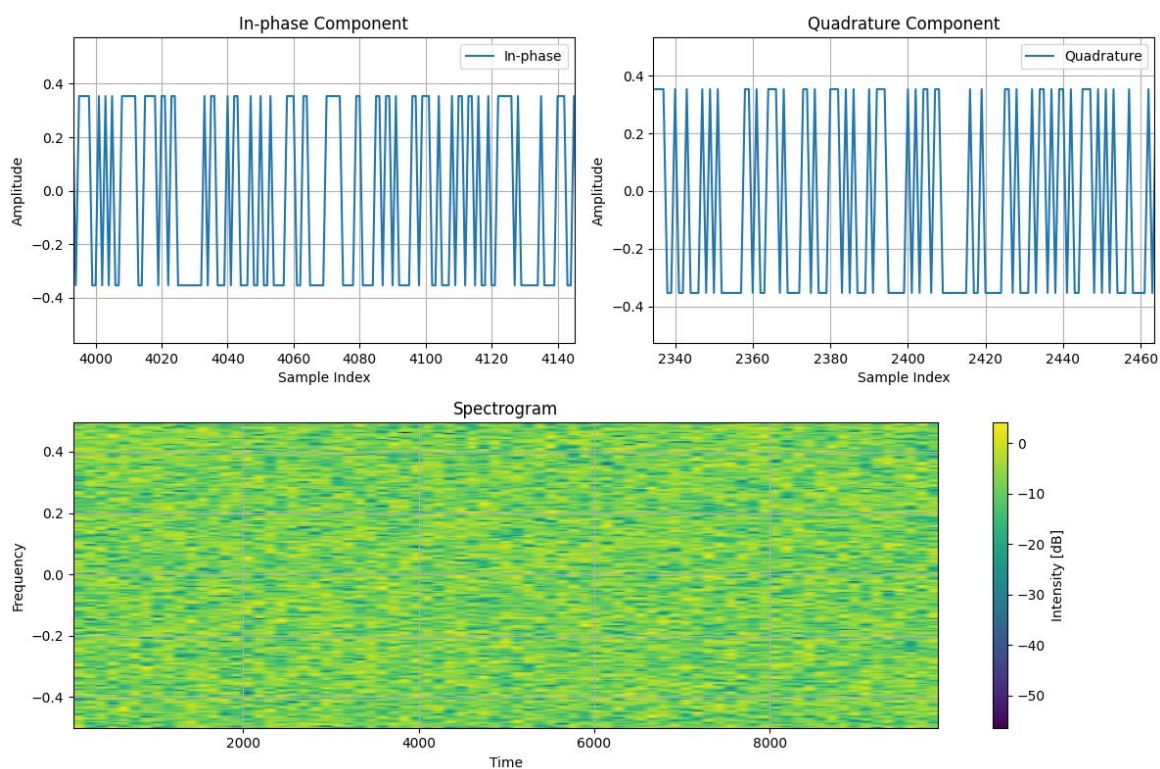


Рисунок 4.4 – Характеристики QPSK сигналу

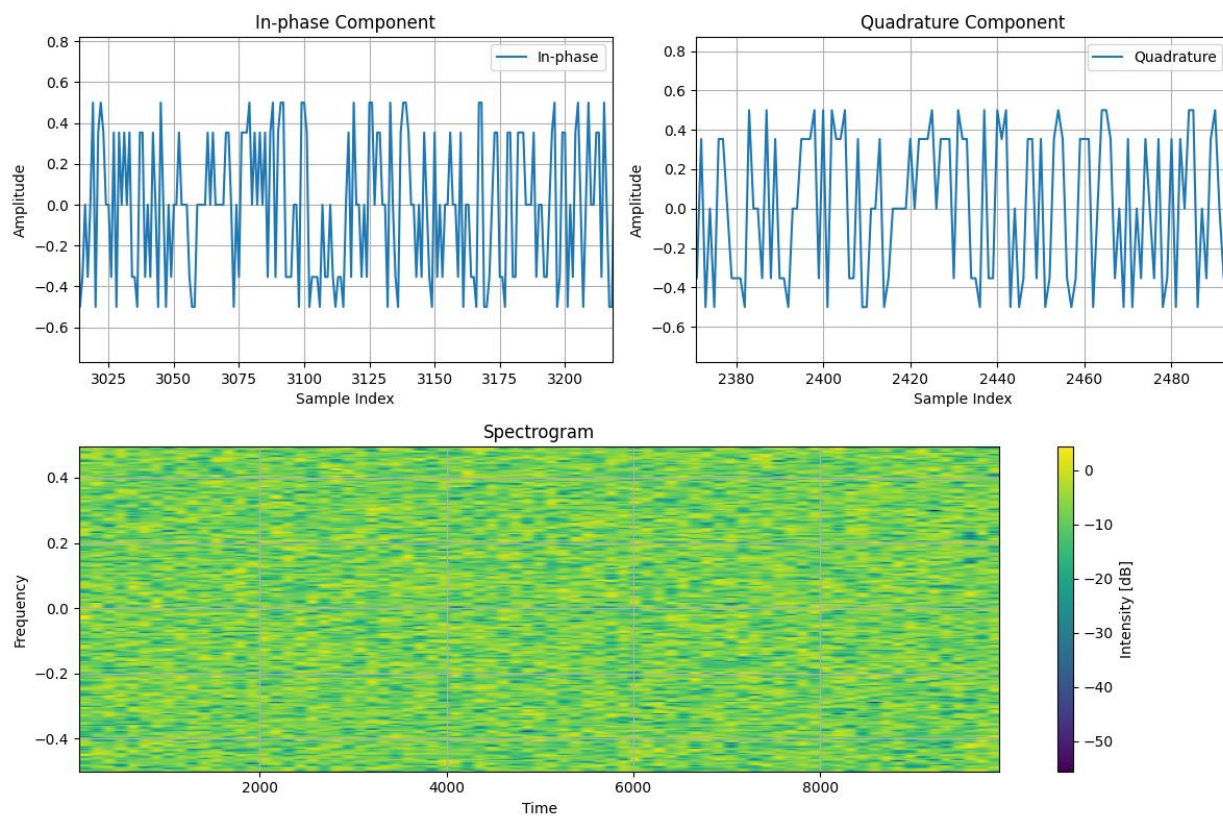


Рисунок 4.5 – Характеристики 8PSK сигналу

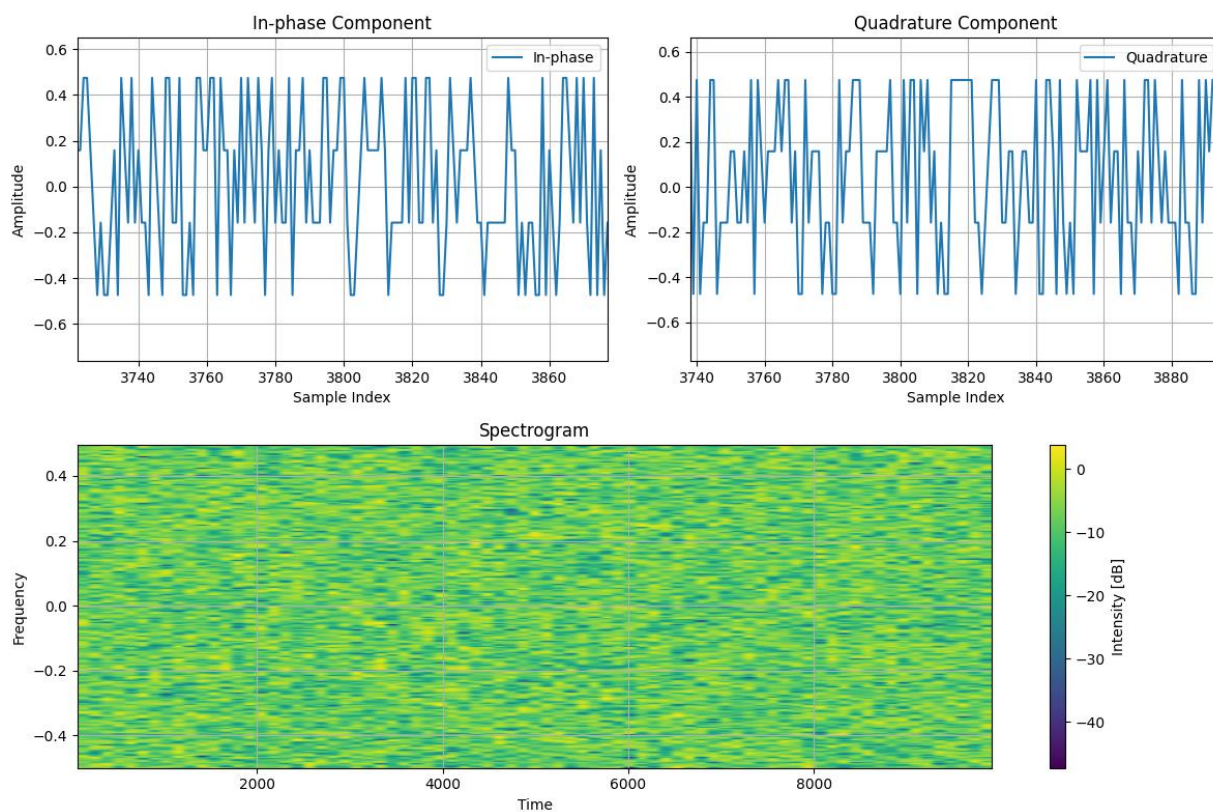


Рисунок 4.6 – Характеристики 16QAM сигналу

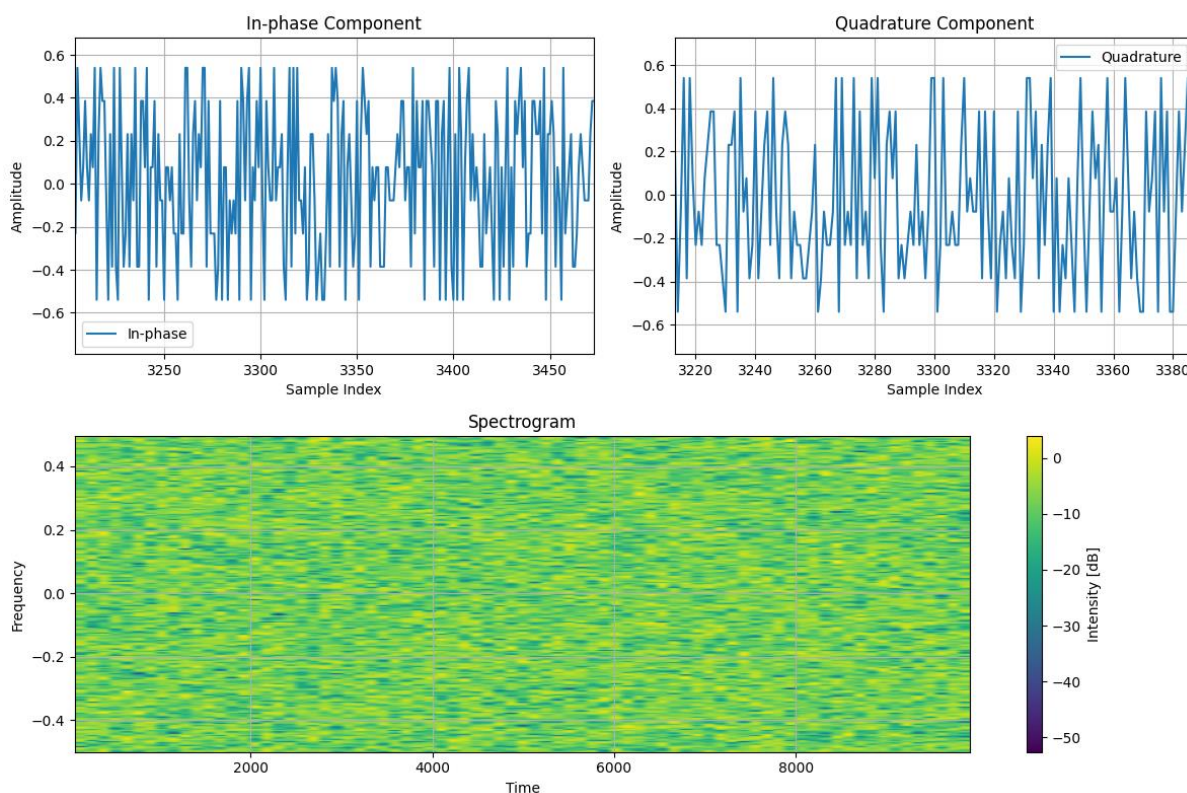


Рисунок 4.7 – Характеристики 64QAM сигналу

Для того щоб вручну не запускати скрипт, створений makefile. В makefile задаємо наступні характеристики тренувального та тестувального наборів:

- 1000 іq відліків в кожному файлі;
- 2000 файлів-зразків для кожного типу модуляції;
- частотний діапазон від 1 до 20 МГц, з кроком в 100 КГц;
- амплітуда від 0.5 В до 1 В з кроком в 0.1 В;
- SNR від -10 дБ до 30 дБ з кроком в 10 дБ.

В результаті отримуємо дві директорії з тестовими та тренувальними даними.

4.4.2 Створення моделі нейронної мережі

В додатку В розміщено скрипт, який дозволяє генерувати нейронну мережу відповідно до тренувальних даних. Мережа послідовного типу (SNN). На рис.4.8 зображено шари, тип шарів, кількість параметрів для кожного шару та їх архітектурна послідовність.

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
flatten (Flatten)	(None, 2)	0
dense (Dense)	(None, 128)	384
dropout (Dropout)	(None, 128)	0
dense_1 (Dense)	(None, 64)	8,256
dropout_1 (Dropout)	(None, 64)	0
dense_2 (Dense)	(None, 5)	325

Рисунок 4.8 – Типи шарів, що входять до складу нейронної мережі.

В мережу входить:

- шар flatten, призначений для створення одновимірної вектора даних з багатовимірної вектора;
- три шари dense, це шари з нейронами;
- два шари dropout, використовується для запобігання перенавчання.

Для процесу тренування використано 10 епох. На рис.4.9 зображено залежність точності для кожної епохи.

Epoch 1/10	281250/281250	244s 862us/step	- accuracy: 0.4223	- loss: 1.3903	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0634
Epoch 2/10	281250/281250	253s 899us/step	- accuracy: 0.4365	- loss: 1.3725	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0736
Epoch 3/10	281250/281250	263s 933us/step	- accuracy: 0.4365	- loss: 1.3714	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0989
Epoch 4/10	281250/281250	252s 893us/step	- accuracy: 0.4360	- loss: 1.3715	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0328
Epoch 5/10	281250/281250	253s 899us/step	- accuracy: 0.4363	- loss: 1.3707	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0933
Epoch 6/10	281250/281250	248s 881us/step	- accuracy: 0.4368	- loss: 1.3706	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.1502
Epoch 7/10	281250/281250	249s 884us/step	- accuracy: 0.4368	- loss: 1.3702	- val_accuracy: 0.0025	- val_loss: 2.0082
Epoch 8/10	281250/281250	245s 868us/step	- accuracy: 0.4368	- loss: 1.3700	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0638
Epoch 9/10	281250/281250	244s 866us/step	- accuracy: 0.4362	- loss: 1.3708	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.0889
Epoch 10/10	281250/281250	247s 877us/step	- accuracy: 0.4366	- loss: 1.3701	- val_accuracy: 0.0000e+00	- val_loss: 2.1513

Рисунок 4.9 – Залежність точності від епохи тренування.

Видно, що 8 епоха має найбільшу точність і додаткове збільшення епох не має сенсу, оскільки кожна епоха це додатковий час тренування.

В результаті маємо згенеровану мережу. Проєкт мережі згенерований мовою C. На рис.4.10 зображено точність визначення типу модуляції сигналів від SNR.

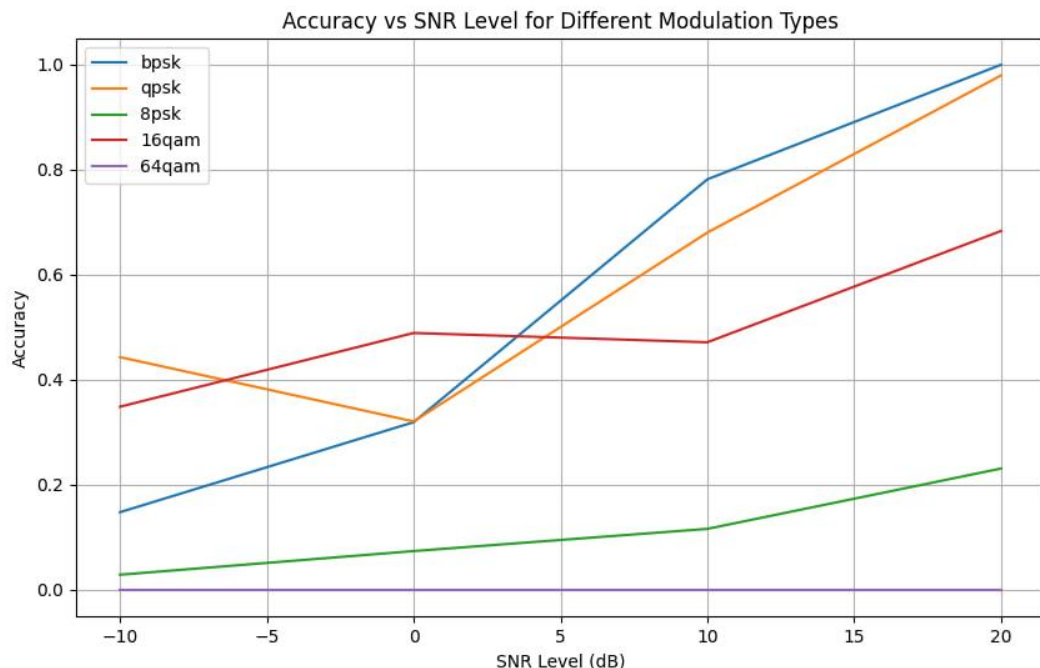


Рисунок 4.10 – Залежність точності визначення типу модуляції від SNR.

Для подальшої роботи необхідно проєкт мовою C, перетворити в код мовою Verilog. Для цього застосуємо інструмент Intel HLS. На рис.4.11 запущене середовище Intel HLS.

```
C:\Users\some_user.WIN-KTGQUD8RMQP\Desktop\nnn\hls4ml-intel-example>C:\intelFPGA_lite\21.1\hls\init_hls.bat
[i] INFO:
Taking this script's directory as the root
of the Intel(r) HLS Compiler installation:
'C:\intelFPGA_lite\21.1\hls\'

[i] INFO:
Quartus is available through your environment:
'C:\intelFPGA_lite\21.1\hls\..\quartus\'->
'C:\intelFPGA_lite\21.1\quartus\'
This setup will make it available on your PATH:
'C:\intelFPGA_lite\21.1\quartus\bin64\quartus_sh.exe'

[i] INFO:
Platform Designer was installed with Quartus.
This setup will make it available on your PATH:
'C:\intelFPGA_lite\21.1\quartus\sopc_builder\bin\qsys-script.exe'

[i] INFO:
ModelSim is available on your PATH:
'C:\intelFPGA_lite\21.1\questa_fse\win64\vsim.exe'

[i] INFO:
Microsoft Visual C++ (MSVC 2017) is available on your PATH:
'C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\2017\Community\VC\Tools\MSVC\14.16.27023\bin\Hostx86\x86\link.exe'

HLS>
```

Рисунок 4.11 – Середовище Intel HLS.

На рис.4.12 видно директорію із згенерованими папками Verilog проєкту.

iq > hls4ml-intel-example > myproject-fpga.prj

Ім'я

components

quartus

reports

verification

debug.log

Дата змінення

07.06.2024 16:37

07.06.2024 16:41

07.06.2024 16:40

07.06.2024 16:41

07.06.2024 16:41

Тип

Папка файлів

Папка файлів

Папка файлів

Папка файлів

Текстовий докум...

Розмір

22 КБ

Пошук: myprojec

Рисунок 4.12 – Автоматично згенеровані папки з файлами за допомогою Intel HLS.

Висновки до розділу 4.

Отже, було згенеровано зразки з даними, а також нейронну мережу. Нейронна мережа є основним ядром пристрою. Програмне моделювання роботи нейронної мережі показало, що точність визначення типу модуляції для SNR=5 дБ (рис.4.10) для моделі складає 57% (BPSK), 50% (QPSK), 48% (16QAM), 16% (8PSK). Отримано проєкти мовою C та мовою Verilog. Компіляція останнього проєкту дозволяє отримати файл прошивки мікросхеми FPGA 5SGXEA7N2F45C2 серії Stratix V від Intel.

Розділ 5. ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ

Розділ містить опис макету для тестування. У розділі включено основні моменти в роботі, на які зверталася увага для запуску тесту на апаратній частині.

5.1 Стенд для тестування

В якості стенду для перевірки напрацювань було обрано плату Storey Peak. Це плата яка використовувалася в проєкті Microsoft Catapult[20]. Плата побудована на базі чіпа серії StratixV від Intel, аналог мікросхеми який використовується в проєкті. На платі розміщено 2 SFP роз'єми, які розраховані на швидкість передачі даних 40G, а також PCIe інтерфейс. На рис.5.1 зображено плату, яка використовується для тестування.



Рисунок 5.1 – Storey Peak, плата для тестування

Для роботи з нею необхідно плату вставити в PCIe роз'єм комп'ютера та підключити до неї USB. На рис.5.2 зображено підключену плату до комп'ютера.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		59



Рисунок 5.2 – Плата встановлена в комп'ютер

Для того щоб налаштувати програмну частину для роботи з платою, а саме, щоб плату можна було перепрошити, необхідно крім quartus налаштувати відповідні драйвери. Інструкція знаходиться за посиланням[21]. Виконавши цю інструкцію та після успішного запуску openocd, має з'явитись вікно як на рис.5.3.

```

volodia@volodia-System-Product-Name: ~/Desktop/jtag-quartus-ft2...
volodia@volodia-System-Product-Name:~/Desktop/jtag-quartus-ft232h/build$ openocd
-f interface/ftdi/um232h.cfg \
-c "adapter speed 20000; transport select jtag; jtag newtap auto0 tap -irlen
10 -expected-id 0x029070dd; init; exit;"
Open On-Chip Debugger 0.11.0
Licensed under GNU GPL v2
For bug reports, read
http://openocd.org/doc/doxygen/bugs.html
Info : ftdi: if you experience problems at higher adapter clocks, try the comman
d "ftdi_tdo_sample_edge falling"
Info : clock speed 20000 kHz
Info : JTAG tap: auto0.tap tap/device found: 0x029070dd (mfg: 0x06e (Altera), pa
rt: 0x2907, ver: 0x0)
Warn : gdb services need one or more targets defined
volodia@volodia-System-Product-Name:~/Desktop/jtag-quartus-ft232h/build$ 

```

Рисунок 5.3 – Успішний запуск openocd.

В результаті, маємо змогу успішно перепрошити чіп. На рис.5.4 показано успішне завантаження прошивки пробного тестового проєкту у плату (для ілюстрації успішної прошивки правильно сконфігурованого стенду з платою Storey Peak).

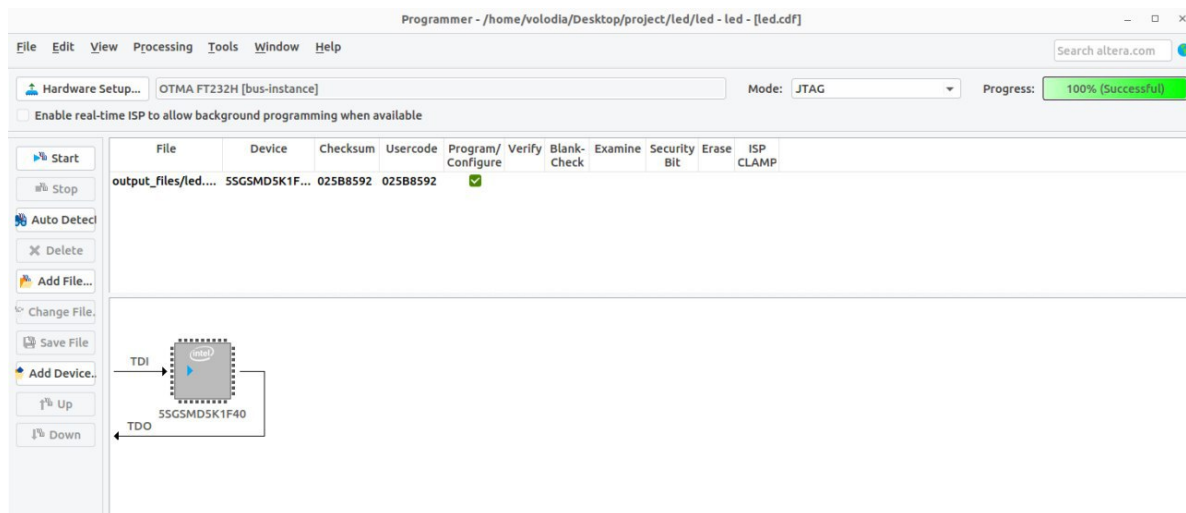


Рисунок 5.4 – Успішне завантаження прошивки у плату.

Наступний етап – компіляція проєкту для отримання файлу прошивки мікросхеми FPGA. На рис.5.5 зображено незакінчений процес компіляції.

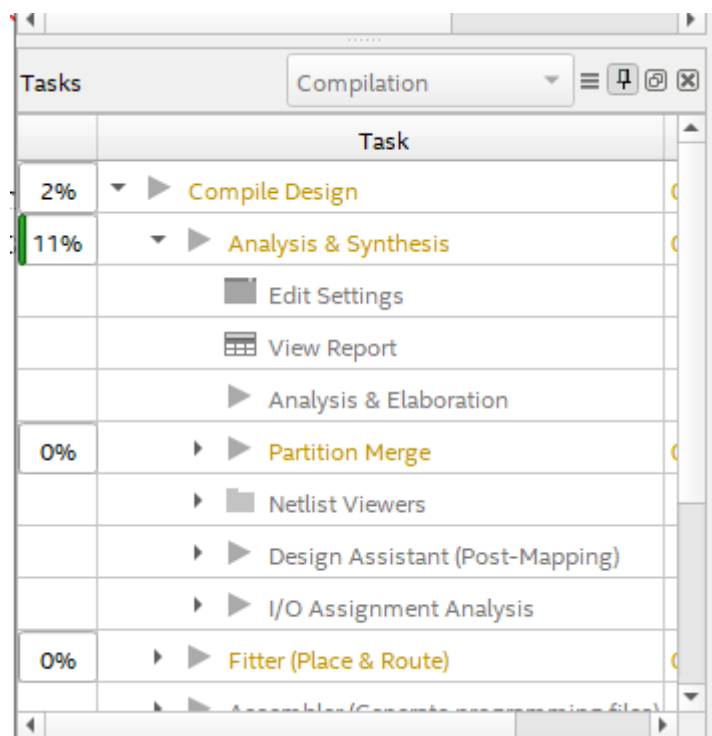


Рисунок 5.5 – Незакінчений процес компіляції.

Через те, що компіляція триває значний проміжок часу (не закінчується протягом 11 годин), а помилок про збої не отримано, не має змоги отримати файл прошивки FPGA та перевірити отримані результати безпосередньо на стенді з платою Storey Peak. Велика ймовірність того, що проєкт завеликий, або малі обчислювальні ресурси комп'ютера, на якому виконувалася робота. Якщо б компіляція була успішна, можна було б за допомогою signaltap отримати результати тестування на залізі. На даному етапі необхідно отримати позитивний результат компіляції. На рис.5.6 зображено приклад сигналу в signaltap.

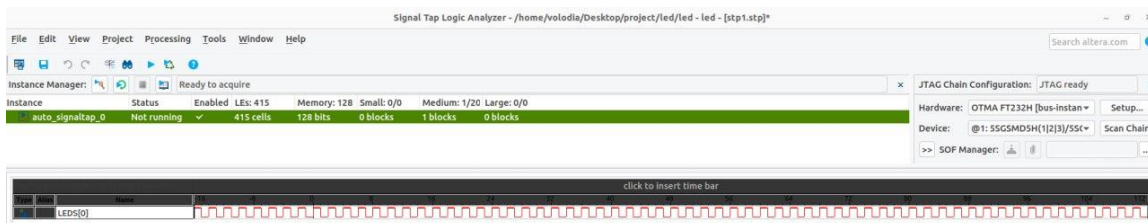


Рисунок 5.6 – Приклад сигналу в signaltap

Висновки до розділу 5.

Отже, зібрано комп'ютерний стенд з платою Storey Peak для перевірки проєкту, виконано налаштування стенду та завантажені відповідні драйвери для прошивки FPGA. Файл прошивки не отримано через те, що проєкт ймовірно завеликий або малі обчислювальні ресурси комп'ютера, на якому виконувалася робота.

Висновки

В процесі виконання дипломного проєкту на тему "Система визначення типу модуляції сигналів" досягнуті практичні результати. Проведено аналіз сучасних наукових джерел і технологій у сфері модуляції сигналів, що дозволило визначити основні проблеми та тенденції розвитку цієї галузі. На основі цього аналізу розроблено методологію створення пристрою.

Розробка пристрою включала проєктування його апаратної та програмної частин. Апаратна частина розроблена на основі мікросхеми FPGA 5SGXEA7N2F45C2 серії Stratix V від Intel, що забезпечило необхідний рівень функціональності пристрою.

Після виконання розрахунків отримали наступні результати:

- маса пристрою 455 г;
- надійність 12 100 год;
- падіння на найдовшому провіднику 0,35 В;
- потужність витрат 3,925 мВт;
- паразитна ємність 7,75 пФ;
- паразитна індуктивність 0,17 нГн.

Для друкованої плати вибрали матеріал FR 4-20-35-1,5.

Для ефективної обробки даних з використанням нейронних мереж застосовувалися сучасні інструменти програмування на Python. Спроектowana система визначає наступні типи модуляції сигналів QPSK, 8PSK, BPSK, QAM16. Для SNR=5дБ точність визначення дорівнює 57% (BPSK), 50% (QPSK), 48% (16QAM), 16% (8PSK).

По результатам виконаної роботи можна сформулювати шляхи удосконалення системи: збільшити кількість зразків для тренування нейронної мережі, для визначення модуляції QAM64 застосувати окрему нейронну мережу з іншою архітектурою, оптимізувати кількість шарів друкованої плати; додати додатковий інтерфейс PCIe; збільшити обсяг пам'яті, додавши зовнішню RAM пам'ять;

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		63

удосконалити алгоритми для підвищення надійності та точності визначення типу модуляції. Крім того, зменшення маси пристрою сприятиме його більш широкому застосуванню.

Однією з важливих рекомендацій є створення різних версій пристроїв в залежності від специфічних завдань. Це дозволить оптимізувати систему для різних умов експлуатації та вимог користувачів, забезпечуючи більш гнучке та ефективне вирішення задач у сфері модуляції сигналів.

Таким чином, завдання дипломного проєкту виконані в повному обсязі. Отримані результати мають важливе практичне значення. Виконаний проєкт сприяє розвитку галузі модуляції сигналів і може бути використаний як основа для подальшого вдосконалення пристроїв та їх застосування у практичній діяльності.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ док-м.	Підпис	Дата		64

Список використаних джерел

1. PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python. URL: https://pysdr.org/content/digital_modulation.html (дата звернення 17.05.2024).
2. Нагорнюк О.А., Писарчук О.О., Павлюк В.В. Методика автоматизованого визначення параметрів сигналу та розпізнання виду модуляції засобами радіомоніторингу в умовах апіорної параметричної невизначеності. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2014. №1 (19). С.63-69.
3. Mohamed M. Elsagheer, Safwat M. Ramzy A hybrid model for automatic modulation classification based on residual neural networks and long short term memory. *Alexandria Engineering Journal*. 2023.Vol. 67. P.117–128.
4. S. Ramjee, S. Ju, D. Yang, X. Liu, A.E. Gamal, Y.C. Eldar, Fast Deep Learning for Automatic Modulation Classification. 2019. ArXiv:1901.05850 [Cs, Eess, Stat].
5. K. Liao, Y. Zhao, J. Gu, Y. Zhang, Y. Zhong, Sequential Convolutional Recurrent Neural Networks for Fast Automatic Modulation Classification. *IEEE Access*.2021.Vol. 9. P. 27182–27188.
6. J.C. Clement, N. Indira, P. Vijayakumar, R. Nandakumar, Deep learning based modulation classification for 5G and beyond wireless systems. *Peer-to-Peer Netw. Appl.* 2021. Vol. 14. P.319–332. URL: <https://doi.org/10.1007/s12083-020-01003-3> (дата звернення 17.05.2024).
7. www.mathworks.com. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/modulation-classification-with-deep-learning.html> (дата звернення 17.05.2024).
8. Патент US 11586879B2.
9. www.standards.ieee.org. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.3-2015_Cor_1/6752/ (дата звернення 17.05.2024).
10. www.mouser.com. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/598/E5_Net_User_Manual-1510947.pdf (дата звернення 17.05.2024).

11. Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної апаратури. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» В. Г. Губар, І. О. Адаменко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 221 с.
12. [www.tensorflow.org](https://www.tensorflow.org/?hl=en): <https://www.tensorflow.org/?hl=en> (дата звернення 28.05.2024).
13. [www.pandas.pydata.org](https://pandas.pydata.org/): <https://pandas.pydata.org/> (дата звернення 28.05.2024).
14. [www.numpy.org](https://numpy.org/): <https://numpy.org/> (дата звернення 28.05.2024).
15. [www.scikit-learn.org](https://scikit-learn.org/stable/): <https://scikit-learn.org/stable/> (дата звернення 28.05.2024).
16. [www.matplotlib.org](https://matplotlib.org/): <https://matplotlib.org/> (дата звернення 28.05.2024).
17. www.riverbankcomputing.com:
<https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/> (дата звернення 28.05.2024).
18. [www.fastmachinelearning.org](https://fastmachinelearning.org/hls4ml/): <https://fastmachinelearning.org/hls4ml/> (дата звернення 28.05.2024).
19. [www.github.com](https://github.com/alexforencich/Verilog-ethernet/tree/master/example/DE5-Net/fpga): <https://github.com/alexforencich/Verilog-ethernet/tree/master/example/DE5-Net/fpga> (дата звернення 28.05.2024).
20. [www.microsoft.com](https://www.microsoft.com/en-us/research/project/project-catapult/): <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/project-catapult/> (дата звернення 28.05.2024).
21. [www.github.com](https://github.com/j-marjanovic/jtag-quartus-ft232h): <https://github.com/j-marjanovic/jtag-quartus-ft232h> (дата звернення 28.05.2024).
22. ГОСТ 12.2.007-75 Вироби електротехнічні. Загальні вимоги безпеки.
23. ГОСТ 23571-86 Плати друковані. Основні параметри конструкції.
24. [www.digikey.at](https://www.digikey.at/htmldatasheets/production/1224153/0/0/1/stratix-v-device-overview.html) <https://www.digikey.at/htmldatasheets/production/1224153/0/0/1/stratix-v-device-overview.html> (дата звернення 28.05.2024).

Додатки

Додаток А.

Технічне завдання на проєктування

1 Найменування та галузь використання.

Класифікатор типу модуляції сигналу з використанням нейронної мережі. Пристрій призначений для визначення типу модуляції сигналу для подальшого вибору демодулятора. Використовується в системах радіозв'язку, пеленгації, радіомоніторингу.

2 Підстава для розробки.

Підставою для розробки є завдання на дипломний проєкт згідно з наказом №2076-с від 23.05.2024 року.

3 Мета і призначення розробки.

Метою розробки є розробка друкованого вузла, як окремого блоку, системи радіозв'язку або радіомоніторингу. Основним завданням в системі, є визначення правильного типу модуляції для подальшого вибору демодулятора.

4 Джерело розробки.

Наказ на проєктування №2076-с від 23.05.2024 року. Технічна документація на FPGA серії Stratix V.

5 Технічні вимоги

5.1 Склад виробу й вимоги до пристрою, що розробляється.

Пристрій має моноблочну конструкцію, яка містить FPGA з відповідними інтерфейсами, вхід отримання сигналу, тип модуляції якого, потрібно визначити. На виході пристрою - сигнал, що передає тип модуляції спеціальним закодованим чином.

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ док.м.	Підпис	Дата		67

5.2 Показники призначення.

Пристрій повинен забезпечувати:

- обробку IQ відліків, які надходитимуть на вхід пристрою;
- визначення наступних типів модуляції: QPSK, 8PSK, BPSK, QAM16, QAM64 (опціонально);
- вивід на вихід інформації про тип модуляції з використанням спеціальних цифрових кодів;
- можливість використовувати самостійно, без використання в складі системи, а також як складову системи.

5.3 Вимоги до надійності.

Середній час напрацювання на відмову повинен бути не менше 10 000 год.

5.4 Вимоги технологічності

Орієнтовані на сучасні технології виготовлення деталей та складання.

5.5 Вимоги до уніфікації та стандартизації.

Для виготовлення пристрою передбачається максимальне застосування стандартних, уніфікованих деталей та виробів.

5.6 Вимоги безпеки обслуговування.

Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури низької напруги ГОСТ 12.2.007-75.

5.7 Вимоги до складових частин виробу, сировини, вихідних й експлуатаційних матеріалів.

Для виробництва пристрою використовують матеріали імпортного виробництва.

5.8 Умови експлуатації.

Кліматичне виконання: використання в сухих не опалюваних приміщеннях, з природньою вентиляцією.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докum.	Підпис	Дата		68

5.9 Вимоги до транспортування та зберігання.

Зберігати в зачинених, опалювальних та вентильованих приміщеннях, в яких забезпечуються наступні умови: температура повітря +5...+40С, відносна вологість повітря 60% при 20⁰ С -(середньорічне значення), атмосферний тиск 84...106кПа. Транспортувати автомобільним, залізничним або авіаційним видами транспорту в спеціальній транспортній тарі.

5.10 Додаткові технічні вимоги.

Технічні характеристики, які повинен мати прилад, вказані в таблиці 1.

Таблиця 1 - Технічні характеристики

Точність визначення при SNR = 5 дБ	> 40 %
Маса	Не більше 500 г
Напруга живлення DC	12 В ± 5%,
Струм споживання	не перевищує 1 А
Габаритні розміри	Не більше 200 мм х 200 мм х 100 мм
Кількість Ethernet base-R виходів	4

6 Результати роботи.

6.1 Результати даної роботи можуть бути використані як вихідна документація по створенню прототипу пристрою, його налагодження й подальшого впровадження в серійне виробництво.

6.2 Дана робота (звітна документація) після виконання надається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігання як навчальної документації.

7 Робота повинна містити в собі документи.

- Пояснювальну записку (формату А4, до 70 аркушів)
- Схему електричну принципову та перелік елементів (формату А0 – А4, А4 відповідно)
- Складальне креслення та специфікацію (формату А1, А4 відповідно)
- Креслення друкованої плати (формату А1)
- Додатки (формату А1-А4)

8 Порядок розгляду й приймання роботи.

Порядок розгляду й приймання роботи на загальних умовах, прийнятих на кафедрі КЕОА. Рецензування й прийняття роботи комісією на загальних умовах.

9 Економічні показники.

В умовах даного проєкту не розглядаються.

					<i>ДКО1.414435.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		70

10 Етапи розробки.

Етапи розробки пристрою вказано в таблиці 2.

Таблиця 2 – етапи розробки

№ п/п	Назва етапу виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту
1	Аналіз завдання на проєктування, огляд аналогів та патентний пошук	10.02.2024р. – 20.02.2024р.
2	Схемотехнічне проєктування	21.02.2024р. – 10.03.2024р.
3	Вибір та обґрунтування елементної бази	11.03.2024р. – 16.03.2024р.
4	Проєктування ДП в Altium Designer, розміщення КЕ на монтажному просторі	17.03.2024р. – 25.03.2024р.
5	Виконання конструкторсько- технологічних розрахунків	26.03.2024р. – 05.04.2024р.
6	Розрахунок електричних параметрів	06.04.2024р. – 12.04.2024р.
7	Розрахунок надійності	13.04.2024р. – 17.04.2024р.
8	Розробка програмного забезпечення	18.04.2024р. – 10.05.2024р.
9	Виконання креслення схеми принципової. Створення переліку елементів	11.05.2024р. – 15.05.2024р.
10	Виконання креслення друкованої плати	16.05.2024р. – 20.05.2024р.

11	Виконання складального креслення. Створення специфікації до складального креслення	21.05.2024р. – 23.05.2024р.
----	---	-----------------------------

Таблиця 2 – продовження

12	Оформлення пояснювальної записки	24.05.2024р. – 31.05.2024р.
----	----------------------------------	-----------------------------

Додаток Б.

Скрипт генерації іq файлів з даними

```
#!/usr/bin/env python3

import numpy as np
import struct
import argparse
import matplotlib.pyplot as plt

def generate_bpsk_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t):
    bits = np.random.randint(0, 2, num_symbols)
    return amplitude * (2 * bits - 1) * np.exp(1j * 2 * np.pi * frequency * t)

def generate_qpsk_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t):
    bits = np.random.randint(0, 2, num_symbols * 2)
    symbols = amplitude * ((2 * bits[0::2] - 1) + 1j * (2 * bits[1::2] - 1))
    return symbols * np.exp(1j * 2 * np.pi * frequency * t) / np.sqrt(2)

def generate_8psk_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t):
    bits = np.random.randint(0, 8, num_symbols)
    angles = bits * (2 * np.pi / 8)
    return amplitude * np.exp(1j * angles) * np.exp(1j * 2 * np.pi * frequency * t)

def generate_16qam_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t):
    bits = np.random.randint(0, 16, num_symbols)
    i = 2 * (bits % 4) - 3
    q = 2 * (bits // 4) - 3
    symbols = amplitude * (i + 1j * q)
```

					ДКО1.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		73

```
return symbols * np.exp(1j * 2 * np.pi * frequency * t) / np.sqrt(10)
```

```
def generate_64qam_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t):
```

```
    bits = np.random.randint(0, 64, num_symbols)
```

```
    i = 2 * (bits % 8) - 7
```

```
    q = 2 * (bits // 8) - 7
```

```
    symbols = amplitude * (i + 1j * q)
```

```
    return symbols * np.exp(1j * 2 * np.pi * frequency * t) / np.sqrt(42)
```

```
def generate_symbols(modulation, num_symbols, frequency, amplitude, snr):
```

```
    """
```

Generate symbols for the specified modulation scheme.

Parameters:

modulation (str): The modulation scheme ('bpsk', 'qpsk', '8psk', '16qam', '64qam').

num_symbols (int): Number of symbols to generate.

frequency (float): Carrier frequency in Hz.

amplitude (float): Amplitude of the signal.

snr (float): Signal-to-Noise Ratio in dB.

Returns:

np.ndarray: Array of symbols in complex format.

```
    """
```

```
    t = np.arange(num_symbols)
```

```
    if modulation == 'bpsk':
```

```
        symbols = generate_bpsk_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t)
```

```
    elif modulation == 'qpsk':
```

```

    symbols = generate_qpsk_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t)
elif modulation == '8psk':
    symbols = generate_8psk_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t)
elif modulation == '16qam':
    symbols = generate_16qam_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t)
elif modulation == '64qam':
    symbols = generate_64qam_symbols(num_symbols, frequency, amplitude, t)
else:
    raise ValueError(f"Unsupported modulation type: {modulation}")

# Calculate signal power and noise power
signal_power = np.mean(np.abs(symbols) ** 2)
snr_linear = 10 ** (snr / 10)
noise_power = signal_power / snr_linear

# Generate noise
noise = np.sqrt(noise_power / 2) * (np.random.randn(num_symbols) + 1j *
np.random.randn(num_symbols))

# Add noise to the symbols
symbols += noise

return symbols

def save_iq_to_file(iq_data, filename):
    """
    Save IQ data to a binary file.

```

Parameters:

iq_data (np.ndarray): Array of complex IQ data.

filename (str): Name of the file to save the data to.

"""

with open(filename, 'wb') as f:

for symbol in iq_data:

real_part = int(np.clip(symbol.real * 32767, -32768, 32767))

imag_part = int(np.clip(symbol.imag * 32767, -32768, 32767))

f.write(struct.pack('hh', real_part, imag_part))

def plot_iq_data(iq_data):

"""

Plot the IQ data in time domain and its spectrogram.

Parameters:

iq_data (np.ndarray): Array of complex IQ data.

"""

plt.figure(figsize=(12, 8))

plt.subplot(2, 2, 1)

plt.plot(iq_data.real, label='In-phase')

plt.title('In-phase Component')

plt.xlabel('Sample Index')

plt.ylabel('Amplitude')

plt.legend()

plt.grid(True)

```
plt.subplot(2, 2, 2)
plt.plot(iq_data.imag, label='Quadrature')
plt.title('Quadrature Component')
plt.xlabel('Sample Index')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.legend()
plt.grid(True)
```

```
plt.subplot(2, 1, 2)
plt.specgram(iq_data, NFFT=256, Fs=1, noverlap=128, cmap='viridis')
plt.title('Spectrogram')
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Frequency')
plt.colorbar(label='Intensity [dB]')
plt.grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
def main(modulation, num_symbols, filename, frequency, amplitude, snr):
    # Generate symbols for the specified modulation scheme
    iq_data = generate_symbols(modulation, num_symbols, frequency, amplitude, snr)

    # Save IQ data to file
    save_iq_to_file(iq_data, filename)

    print(f"Generated {num_symbols} {modulation.upper()} symbols with SNR {snr}
    dB, with amplitude {amplitude} V, with frequency {frequency} Hz and saved to
    {filename}")
```

```

# Plot the generated IQ data
#plot_iq_data(iq_data)

if __name__ == "__main__":
    parser = argparse.ArgumentParser(description="Generate IQ samples for various
modulation schemes.")

    parser.add_argument('modulation', choices=['bpsk', 'qpsk', '8psk', '16qam', '64qam'],
help="Type of modulation")

    parser.add_argument('num_symbols', type=int, help="Number of symbols to
generate")

    parser.add_argument('filename', help="Output file name")

    parser.add_argument('--frequency', type=float, default=1e6, help="Carrier frequency
in Hz")

    parser.add_argument('--amplitude', type=float, default=1.0, help="Amplitude of the
signal")

    parser.add_argument('--snr', type=float, default=20, help="Signal-to-Noise Ratio in
dB")

    args = parser.parse_args()

    main(args.modulation, args.num_symbols, args.filename, args.frequency,
args.amplitude, args.snr)

```

Додаток В.

Makefile для автоматичного запуску скрипта генерації даних.

```
SCRIPT = iq.py

NUM_SAMPLES = 1000

NUM_TRAIN = 2000

NUM_TEST = 100

FREQUENCY_MIN = 1e6

FREQUENCY_MAX = 20e6

AMPLITUDE_MIN = 0.5

AMPLITUDE_MAX = 1

SNR_MIN = -10

SNR_MAX = 30

OUTPUT_TRAIN_DIR = train_data

OUTPUT_TEST_DIR = test_data


# Modulation types

MODULATIONS = bpsk qpsk 8psk 16qam 64qam


# Rules

all: $(OUTPUT_TRAIN_DIR) $(OUTPUT_TEST_DIR) generate_train_data
generate_test_data

$(OUTPUT_TRAIN_DIR):

    mkdir -p $(OUTPUT_TRAIN_DIR)
```

					ДК01.414435.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		79

\$(OUTPUT_TEST_DIR):

mkdir -p \$(OUTPUT_TEST_DIR)

generate_train_data: \$(MODULATIONS:%=train_%)

generate_test_data: \$(MODULATIONS:%=test_%)

train_%: | \$(OUTPUT_TRAIN_DIR)

@for i in \$(shell seq 1 \$(NUM_TRAIN)); do \

frequency=\$(python3 -c "import random; print(random.randrange(int(\$(FREQUENCY_MIN)), int(\$(FREQUENCY_MAX)), 100000))"); \

amplitude=\$(python3 -c "import random; print(round(random.uniform(\$(AMPLITUDE_MIN), \$(AMPLITUDE_MAX)), 1))"); \

snr=\$(python3 -c "import random; print(random.randrange(int(\$(SNR_MIN)), int(\$(SNR_MAX)), 1))"); \

filename="\$(OUTPUT_TRAIN_DIR)/\$@_\${i}_freq\$(printf %.0f \$frequency)_amp\$(printf %.1f \$amplitude)_snr\$(printf %.0f \$snr).iq"; \

./\$(SCRIPT) \$* \$(NUM_SAMPLES) \$filename --frequency \$frequency -
-amplitude \$amplitude --snr \$snr; \

done

test_%: | \$(OUTPUT_TEST_DIR)

					ДК01.414435.001 ПЗ	Адк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		80

```

@for i in $(shell seq 1 $(NUM_TEST)); do \

    frequency=$(python3 -c "import random;
print(random.randrange(int($(FREQUENCY_MIN)), int($(FREQUENCY_MAX)),
100000))"); \

    amplitude=$(python3 -c "import random;
print(round(random.uniform($(AMPLITUDE_MIN), $(AMPLITUDE_MAX)), 1))"); \

    snr=$(python3 -c "import random;
print(random.randrange(int($(SNR_MIN)), int($(SNR_MAX)), 1))"); \

    filename="$(OUTPUT_TEST_DIR)/@_${i}_freq$(printf %.0f
$$frequency)_amp$(printf %.1f $$amplitude)_snr$(printf %.0f $$snr).iq"; \

    ./$(SCRIPT) $* $(NUM_SAMPLES) $$filename --frequency $$frequency -
-amplitude $$amplitude --snr $$snr; \

done

clean:

rm -rf $(OUTPUT_TRAIN_DIR) $(OUTPUT_TEST_DIR)

.PHONY: all clean $(MODULATIONS) generate_train_data generate_test_data

```

Додаток Г.

Скрипт генерації моделі нейронної мережі

```
#!/usr/bin/env python3
```

```
import numpy as np
```

```
from tensorflow.keras.models import Sequential
```

```
from tensorflow.keras.layers import Dense, Flatten, Dropout
```

```
import os
```

```
import glob
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Function to load IQ data and their labels from individual files
```

```
def load_data(directory, prefix, num_files):
```

```
    data = []
```

```
    labels = []
```

```
    modulation_types = ['bpsk', 'qpsk', '8psk', '16qam', '64qam']
```

```
    for i, modulation in enumerate(modulation_types):
```

```
        file_pattern = os.path.join(directory, f'{prefix}_{modulation}*.iq')
```

```
        files = glob.glob(file_pattern)[:num_files] # Limit to num_files
```

```
        for filename in files:
```

```
            iq_data = np.fromfile(filename, dtype=np.int16)
```

```
            iq_data = iq_data.astype(np.float32) / 32767.0 # Normalization to range [-1, 1]
```

					ДК01.414435.001 ПЗ	Арх.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		82

```

    iq_data = iq_data.reshape((-1, 2)) # Separating real and imaginary parts

    data.append(iq_data)

    labels.extend([i] * len(iq_data)) # Assigning the label to each sample in the file

data = np.vstack(data)

labels = np.array(labels)

return data, labels

# Function to create the neural network model

def create_model(input_shape):

    model = Sequential([

        Flatten(input_shape=input_shape),

        Dense(128, activation='relu'),

        Dropout(0.5),

        Dense(64, activation='relu'),

        Dropout(0.5),

        Dense(5, activation='softmax')

    ])

    model.compile(optimizer='adam',

                  loss='sparse_categorical_crossentropy',

                  metrics=['accuracy'])

    return model

# Function to load test data for different noise levels

def load_test_data(directory, modulation_types, snr_levels):

```

					ДКО1.4 14435.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Ар	№ докум.	Підпис	Дата		83

```

test_data = {snr: [] for snr in snr_levels}

test_labels = {snr: [] for snr in snr_levels}

for modulation_index, modulation in enumerate(modulation_types):

    for snr in snr_levels:

        file_pattern = os.path.join(directory, f"test_{modulation}_*_snr{snr}.iq")

        files = glob.glob(file_pattern)

        if not files:

            continue

        for filename in files:

            iq_data = np.fromfile(filename, dtype=np.int16)

            iq_data = iq_data.astype(np.float32) / 32767.0 # Normalization to range [-
1, 1]

            iq_data = iq_data.reshape((-1, 2)) # Separating real and imaginary parts

            test_data[snr].append(iq_data)

            test_labels[snr].extend([modulation_index] * len(iq_data)) # Assigning the
label to each sample in the file

        for snr in snr_levels:

            if test_data[snr]: # Check if there's data for this SNR level

                test_data[snr] = np.vstack(test_data[snr])

                test_labels[snr] = np.array(test_labels[snr])

            else:

                test_data[snr] = np.array([]).reshape(0, 2) # Assign empty arrays if no data

                test_labels[snr] = np.array([])

    return test_data, test_labels

```

```
# Loading training data
```

```
train_data, train_labels = load_data('train_data', 'train', 2000)
```

```
# Loading testing data for different SNR levels
```

```
modulation_types = ['bpsk', 'qpsk', '8psk', '16qam', '64qam']
```

```
snr_levels = [-10, 0, 10, 20, 30] # Noise levels in dB
```

```
test_data, test_labels = load_test_data('test_data', modulation_types, snr_levels)
```

```
# Creating and training the model
```

```
model = create_model(input_shape=train_data.shape[1:])
```

```
model.summary()
```

```
model.fit(train_data, train_labels, epochs=10, validation_split=0.1)
```

```
# Evaluate accuracy for each modulation type under different noise levels
```

```
accuracies = {modulation: [] for modulation in modulation_types}
```

```
for snr in snr_levels:
```

```
    if test_data[snr].size > 0: # Ensure there's data for this SNR level
```

```
        predictions = model.predict(test_data[snr])
```

```
        for modulation_index, modulation in enumerate(modulation_types):
```

```
            indices = np.where(test_labels[snr] == modulation_index)
```

```
            mod_accuracy = np.mean(np.argmax(predictions[indices], axis=1) ==  
test_labels[snr][indices])
```

```

        accuracies[modulation].append(mod_accuracy)

    else:

        for modulation in modulation_types:

            accuracies[modulation].append(np.nan) # Assign NaN if no data for this SNR
            level

# Plotting the results

plt.figure(figsize=(10, 6))

for modulation in modulation_types:

    plt.plot(snr_levels, accuracies[modulation], label=modulation)

plt.xlabel('SNR Level (dB)')

plt.ylabel('Accuracy')

plt.title('Accuracy vs SNR Level for Different Modulation Types')

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.show()

# Saving the model

model.save('modulation_detection_model.keras')

import hls4ml

precision='ac_fixed<16, 6, true>'

reuse_factor=1

```

```

output_dir = r'hls4ml-intel-example'

hls_config = hls4ml.utils.config_from_keras_model(model, granularity='name',
default_precision=precision, default_reuse_factor=reuse_factor)

hls_config['Model']['Strategy'] = 'Resource'


# Device can be Arria10, Stratix10, Agilex, CycloneV, Cyclone10GX etc. - depends
on version of Quartus running locally

hls_model = hls4ml.converters.convert_from_keras_model(
    model,
    hls_config=hls_config,
    output_dir=output_dir,
    backend='Quartus',
    part='CycloneV')

hls_model.compile()


# Print neural network type

print("Neural Network Model Type: Sequential")

```