НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Ігоря Сікорського»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Лисенко О.М.
(ініціали, прізвище)
"19" червня 2025р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка"
(код та назва напряму підготовки або спеціальності)

на тему Пристрій генерації звукових сигналів із застосуванням штучного інтелекту

Виконав: студент IV курсу, групи ДК-11
Данилович Олександр Ігорович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник асистент, доктор філософії, Зилевіч М. О. _____
(посада, 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 - 2025 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського »

Факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Освітньо-кваліфікаційний рівень – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Лисенко О.М.
(прізвище ініціали)

«24» 02 2025р.

Завдання

на дипломний проєкт студенту

Даниловичу Олександру Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту Пристрій генерації звукових сигналів із застосуванням штучного інтелекту керівник проєкту Зилевіч Максим Олегович, доктор філософії, затверджені наказом по університету 1885-с від 03.06.2025.
2. Термін подання студентом проєкту 12.06.2025 року
3. Вихідні дані до проєкту. Пристрій музичного призначення. Використовується для генерації звукових сигналів. Являє собою синтезатор на базі мікроконтролера з роз’ємами для підключення зовнішніх елементів з реалізацією онлайн доступу до інструментів штучного інтелекту для генерації гармонійно поєднаних нот та виведення їх на дисплей.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
   - аналіз сучасних технічних рішень у сфері синтезу звуку;
   - аналіз технічного завдання;
   - розробка структурної та схеми електричної принципової ;

- вибір і обґрунтування елементної бази;
- розрахунки номіналів елементів принципової схеми;
- симуляція звукового генератора та логіки керування;
- проєктування друкованого вузла;
- конструкторсько-технологічні розрахунки друкованої плати;
- електричний розрахунок друкованої плати;
- розрахунок надійності та вібростійкості друкованої плати;
- розрахунок теплового режиму;
- розробка програмного забезпечення;
- висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):
   - схема електрична принципова;
   - друкована плата;
   - складальне креслення друкованої плати;
   - структурна схема пристрою.
6. Дата видачі завдання 24.02.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	25.02.25-20.03.25	Виконано
2	Схемотехнічне проєктування та вибір елементної бази	20.03.25-28.03.25	Виконано
3	Виконання креслень схеми електричної принципової	28.03.25-07.04.25	Виконано
4	Конструкторсько-технологічні Розрахунки	07.04.25-22.04.25	Виконано
5	Електричний розрахунок друкованої плати	22.04.25-29.04.25	Виконано
6	Розрахування надійності друкованого вузла	29.04.25-03.05.25	Виконано
7	Розрахунок вібростійкості друкованої плати	03.05.25-06.05.25	Виконано
8	Проєктування друкованого вузла та трасування у Altium Designer	06.05.25-14.05.25	Виконано
9	Виконання креслень друкованої плати та складального креслення друкованого вузла	14.05.25-21.05.25	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	21.05.25-06.06.25	Виконано

Студент _____ Данилович О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту _____ Зилевіч М.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Аналіз сучасних технічних рішень в сфері аудіотехнологій, зокрема цифрової генерації звуку, демонструє зростаючу інтеграцію штучного інтелекту в музичну композицію та синтез звуку. У контексті генеративної музики та алгоритмічної творчості, системи, що поєднують генерацію аналогового звуку з інтелектуальними механізмами керування, набувають все більшої актуальності. Ці гібридні пристрої реалізують розширену музичну автономію та гнучкість, що відповідає сучасним вимогам інновацій в технічних рішеннях, що використовуються для створення електронної музики.

Розроблена система являє собою аналоговий аудіосинтезатор, що поєднує традиційний аналоговий сигнальний шлях. Аналогова секція базується на субтрактивній структурі синтезу, тобто за основу береться тембр, з якого, за допомогою частотного фільтра, прибираються зайві сигнали до досягнення необхідного звуку, використовуючи ключові модулі, такі як генератор з керованим напругою, фільтр керований напругою та підсилювач. Мікроконтролер Raspberry Pi Zero WH служить обчислювальним блоком, що забезпечує зв'язок з моделлю штучного інтелекту, здатною генерувати гармонійно поєднані послідовності нот. Дисплей відображає вихідні дані, а взаємодія з користувачем здійснюється за допомогою двох кнопок: одна для запиту нової послідовності, а інша для виклику попередньої.

Система поєднує високоякісний аналоговий звук з адаптивною поведінкою цифрового інтелекту, що робить її перспективною в галузі експериментального музичного виробництва, дослідницьких лабораторіях, аудіоінженерії та освітніх програмах зі синтезу звуку. Крім того, відкритий характер архітектури спрямований на масштабування проєкту шляхом інтеграції алгоритмів нового покоління та модулів синтезу.

Проєкт представлений на 63 сторінках, містить 5 розділів, 21 ілюстрацій, 7 таблиці та 12 джерел у списку літератури.

Ключові слова: аналоговий синтезатор, штучний інтелект, генерація нот, Raspberry Pi, цифрова обробка сигналів.

ABSTRACT

Analysis of modern technical solutions in the field of audio technologies, in particular digital sound generation, demonstrates the growing integration of artificial intelligence into musical composition and sound synthesis. In the context of generative music and algorithmic creativity, systems that combine analog sound generation with intelligent control mechanisms are becoming increasingly relevant. These hybrid devices implement extended musical autonomy and flexibility, which meets the modern requirements of innovation in technical solutions used to create electronic music.

The developed system is a hybrid audio synthesizer that combines a traditional analog signal path with artificial intelligence-based note generation. The analog section is based on a subtractive synthesis structure, i.e. the timbre is taken as the basis, from which, using a frequency filter, unnecessary signals are removed until the desired sound is achieved, using key modules such as a voltage-controlled generator, a voltage-controlled filter and an amplifier. The Raspberry Pi Zero WH microcontroller serves as a computing unit that provides communication with an artificial intelligence model capable of generating harmoniously balanced note sequences. The display shows the output data, and user interaction is carried out using two buttons: one to request a new sequence, and the other to call up the previous one.

The system combines high-quality analog sound with adaptive behavior of digital intelligence, which makes it promising in the field of experimental music production, research laboratories, audio engineering and educational programs in sound synthesis. In addition, the open nature of the architecture is aimed at scaling the project by integrating next-generation algorithms and synthesis modules.

The project is presented on 63 pages, contains 5 sections, 21 illustrations, 7 tables and 12 sources in the literature list.

Keywords: analog synthesizer, artificial intelligence, note generation, Raspberry Pi, digital signal processing.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту

на тему: **Пристрій генерації звукових сигналів із застосуванням штучного інтелекту**

Київ – 2025 року

ЗМІСТ

ВСТУП..... Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ОГЛЯД НАЯВНИХ РІШЕНЬ.... 6
1.1 Синтезатори, їх використання та види 6
1.1.1 Види синтезаторів..... 6
1.1.2 Основні компоненти синтезаторів..... 7
1.2 Принцип роботи запропонованого у проєкті синтезатора..... 11
1.3 Аналіз наявних рішень 12
1.4 Вимоги до проєктування 14
1.5 Формування технічного завдання..... 15
Висновок до розділу 1 18
РОЗДІЛ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ..... 19
2.1 Розробка структурної схеми пристрою..... 19
2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази 21
2.3 Вибір мікроконтролера..... 22
2.4 Вибір операційного підсилювача 24
2.5 Вибір дисплею..... 25
2.6 Вибір кнопок для керування..... 27
2.7 Вибір блока живлення для синтезатора 27
Висновок до розділу 2 28
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ..... 30
3.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати..... 30
3.2 Вибір та обґрунтування методу виготовлення друкованої плати 32
3.3 Вибір та обґрунтування класу точності друкованої продукції 33
3.4 Проєктування друкованої плати в середовищі Altium Designer..... 36
Висновок до розділу 3 37
Розділ 4. РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ 39
4.1 Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів ДП..... 39
4.1.1 Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для ланцюгів живлення і землі..... 39

4.1.2 Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому 40
4.1.3 Визначення діаметра контактної площадки 41
4.1.4 Визначення мінімальної ширини провідника 42
4.1.5 Визначення мінімальної відстані між двома сусідніми провідниками 42
4.1.6 Визначення мінімальної відстані між двох контактних площин 43
4.2 Електричний розрахунок друкованої плати 43
4.2.1 Визначення падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику 43
4.2.2 Визначення потужності втрат двошарової друкованої плати 44
4.2.3 Визначення ємності між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні ДП та мають однакову ширину 44
4.2.4 Визначення взаємної індуктивності двох паралельних провідників однакової довжини 45
4.3. Розрахунки основних показників надійності 45
4.3.1 Коефіцієнт навантаження резисторів: 46
4.3.2 Коефіцієнт навантаження для конденсаторів: 46
4.3.3 Коефіцієнт навантаження для діодів: 46
4.3.4 Коефіцієнт навантаження для операційних підсилювачів: 47
4.3.5 Середній час напрацювання до першої відмови: 47
4.3.6 Ймовірність безвідмовної роботи протягом року: 49
4.3.7 Ймовірність відмов протягом року: 49
4.4 Розрахунок вібромiцності друкованого вузла 49
Висновок до розділу 4 51
Розділ 5. АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 53
5.1 Код програми та опис її частин 53
5.1.1 Підключення бібліотек та імпорт модулів 53
5.1.2 Оголошення класу та ініціалізація 54
5.1.3 Основний метод запиту до ШІ 55
5.1.4 Виконання HTTP-запиту 56
5.1.5 Обгортка для запитів з fallback-механізмом 57
5.1.6 Вибір музичної тональності та настрою 57
5.1.7 Генерація нотної прогресії 58
5.1.8 Основний метод композиції 59
5.2 Алгоритм роботи 60
Висновок до розділу 5 62

Висновки 63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ І ПОСИЛАННЯ..... 64
ДОДАТОК А: Технічне завдання на проектування..... 64
ДОДАТОК Б: Код програми..... 67

ВСТУП

В останні роки інтеграція штучного інтелекту в творчу та технічну сфери значно розширила межі цифрової обробки сигналів та аудіосинтезу. Розробка інтелектуальних аудіосинтезаторів стає дедалі актуальнішою через зростаючий попит на адаптивну генерацію звуку в реальному часі в таких галузях, як музичне виробництво, інтерактивні медіа та розробка ігор. Традиційні синтезатори, хоча й універсальні, значною мірою залежать від ручного налаштування та попередньо визначених звукових пресетів, що може обмежувати їхню виразність та адаптивність у динамічних середовищах.

Аналіз сучасної літератури, включаючи вітчизняні та міжнародні наукові публікації, патенти та тематичні дослідження лідерів галузі, таких як Yamaha, Native Instruments та проєкт Google Magenta, виявив чітку тенденцію до підходів, керованих штучним інтелектом. Ці системи використовують нейронні мережі, генеративні моделі та навчання з підкріпленням для створення або маніпулювання аудіо з мінімальним втручанням людини. Незважаючи на прогрес у цій галузі, залишається технологічна прогалина у впровадженні легких та доступних синтезаторів із використанням штучного інтелекту в реальному часі, придатних для вбудованих платформ (спеціалізовані апаратні рішення з обмеженими обчислювальними ресурсами такі як, педалі ефектів для гітар, драм-машини та семплери тощо) або освітніх програм.

Запропонований проєкт спрямований на усунення цієї прогалини шляхом розробки та впровадження аудіосинтезатора, який використовує штучний інтелект для генерації гармонійно узгоджених та стилістично адаптивних аудіопослідовностей.

Використані в проєкті рішення базовані на використанні компактних нейронних архітектур для генерації мелодій, механізмів виведення аудіо в режимі реального часу та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача для

інтерактивного керування. Цей проєкт також досліджує потенційну інтеграцію стратегій периферійних обчислень, що робить синтезатор придатним для розгортання на обладнанні з обмеженими ресурсами.

Розроблений синтезатор може бути використаний як інструмент для цифрової музичної творчості, інтерактивних звукових інсталяцій або освітніх цілей у галузі акустики та електроніки. Завдяки гнучкій архітектурі та можливості генерації гармонійно узгоджених звукових послідовностей, система може застосовуватися у створенні користувацьких аудіоінтерфейсів, звукових супроводів у вбудованих пристроях або у розробці звукових ефектів для відеоігор та мультимедійних застосунків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ОГЛЯД НАЯВНИХ РІШЕНЬ

1.1 Синтезатори, їх використання та види

Синтезатор — це електронний музичний інструмент, призначений для генерації звукових сигналів, які перетворюються на чутний звук. На відміну від акустичних інструментів, де звук створюється механічними коливаннями, синтезатор генерує сигнал електронним способом за допомогою генераторів (осциляторів), фільтрів, підсилювачів та модуляторів[1].

Синтезатори використовуються в музичній індустрії, звукозаписі, розробці мультимедійних продуктів, а також для освітніх та дослідницьких цілей. Головною особливістю синтезаторів є здатність створювати широкий діапазон звуків, включаючи моделювання тембрів акустичних інструментів та створення штучних сигналів, нехарактерних для природного звукового середовища.

1.1.1 Види синтезаторів

Синтезатори можна умовно класифікувати за технікою створення звуку:

1. Аналогові синтезатори

- Використовують аналогові схеми та компоненти, керовані напругою;
- Генерують періодичні електричні сигнали гармонійної (синусоїдальної), прямокутної, пилкоподібної та трикутної форм, які використовуються як основа для подальшої обробки в процесі синтезу звуку;
- Параметри синтезу контролюються за допомогою аналогових керуючих сигналів, які визначають значення параметрів (наприклад, частоту генерації, глибину модуляції), а також цифрових імпульсних сигналів, які сигналізують про початок і кінець звукової події;
- Приклади: Moog Sub Phatty, Korg MS-20.

2. Цифрові синтезатори

- Використовують цифрову обробку сигналу для створення звуку;
- Підтримує реалізацію передових методів синтезу звуку, включаючи

частотну модуляцію, табличний синтез, адитивний та гранулярний синтез;[2]

- Характеризується компактним дизайном та багатофункціональністю; однак, отриманий звук проявляє властивості, які є більш штучними або згенерованим електронним способом порівняно з акустичними джерелами;
- Приклади: Yamaha DX7, Waldorf Blofeld.

3. Програмні синтезатори

- Існують повністю як програмні плагіни;
- Мають багато функцій та дешеві для використання;
- Приклади: Serum, Massive, Sylenth1.

4. Модульні синтезатори

- Модульні синтезатори складаються з дискретних функціональних блоків (модулів), таких як осцилятори, фільтри, генератори обвідної, секвенсори, підсилювачі та низькочастотні осцилятори. Кожен модуль виконує певне завдання в тракті аудіосигналу або ланцюзі напруги керування.
- Конфігурація та маршрутизація сигналу виконуються вручну за допомогою патч-кабелів. Це дає можливість користувачам створювати власні сигнальні шляхи, підключаючи входи та виходи різних модулів. Формат Eurorack є найпоширенішим стандартом для модульних синтезаторів; він визначає фізичні розміри (висота 13,3 см), вимоги до живлення (±12 В постійної напруги) та специфікації роз'ємів. Інші формати включають Moog Unit (MU), Serge, Buchla та Frac Rack, кожен з яких має різні форм-фактори та електричні стандарти.
- Приклади: Moog Mother-32, Doepfer A-100 System, Make Noise 0-Coast

1.1.2 Основні компоненти синтезаторів

1. Осцилятор (VCO – Voltage-Controlled Oscillator)

Осцилятор є основним джерелом звуку в синтезаторі, який генерує безперервні хвилі на частотах від 20 Гц до 20 кГц. Форма цих хвиль визначає характер звуку.

Загальні форми хвилі:

- Синусоїда – чистий тон, без гармонік.
- Прямокутна хвиля – має спектр, що складається з непарних гармонік з амплітудами, обернено пропорційними порядку гармоніки. Завдяки різкому переходу між рівнями сигналу, вона створює сигнал з високим ступенем спектральної енергії в діапазоні середніх частот.
- Пилкоподібна хвиля – містить як парні, так і непарні гармоніки з амплітудами, обернено пропорційними номеру гармоніки. Це надає їй широкого спектрального складу та високого рівня спектральної щільності у верхньому діапазоні.
- Трикутна хвиля – також містить лише непарні гармоніки, але їх амплітуда зменшується пропорційно квадрату порядку гармоніки. Це зумовлює менший вміст високочастотних складових і, відповідно, згладжену форму хвилі.

Цифрові синтезатори використовують програмні алгоритми замість класичних аналогових осциляторів.

2. Фільтр (VCF – Voltage-Controlled Filter)

Фільтр формує тембр звуку, видаляючи або посилюючи певні частоти. Найпоширенішим типом є фільтр низьких частот, що пропускає низькі частоти, обрізаючи високі.

Типи фільтрів:

- Фільтр низьких частот (LPF) – обрізає високі частоти.
- Фільтр верхніх частот (HPF) – обрізає низькі частоти.
- Смуговий фільтр (BPF) – дозволяє лише вузький діапазон частот.
- Нотч фільтр (band-reject) – видаляє певну смугу частот.

Багато фільтрів реалізують можливість резонансного підсилення поблизу граничної частоти, що викликає локальне збільшення амплітуди АЧХ. Що у свою чергу підсилює частоти, близькі до смуги пропускання, і таким чином збільшує швидкість загасання переходу між смугою пропускання та смугою затримування, забезпечуючи більш точне розділення частот сигналу.

3. Підсилювач (VCA – Voltage-Controlled Amplifier)

У синтезаторі підсилювач, керований напругою (VCA), — це модуль обробки сигналів, який керує амплітудою аудіосигналу як функцією часу та вхідного керування. Хоча генератор створює форму хвилі з постійною амплітудою, VCA модулює цю амплітуду зовнішніми керуючими напругами, зазвичай від генератора огинаючої або низькочастотного генератора (LFO). Що точно формує огинаючу амплітуди сигналу в часі, що є важливим для відтворення динамічних характеристик та патернів, що зустрічаються в природних акустичних звуках.

4. Генератор огинаючої (EG або ADSR)

Генератор обвідної — це фундаментальний модуль керування як в аналогових, так і в цифрових синтезаторах, який використовується для визначення того, як певні параметри звуку, зазвичай амплітуда, зріз фільтра або висота тону, змінюються з часом у відповідь на натискання клавіші. Огинаюча забезпечує змінний у часі керуючий сигнал, який додає артикуляції та динамічної виразності до статичних хвиль, що створюються осциляторами.

- Attack (атака) — час, за якого звук досягає максимальної гучності після запуску.
- Decay (спад) — час, протягом якого потужність знижується до рівня утримання.
- Sustain (утримання) — рівень високості, який зберігається, поки залишається у клавіші.
- Release (затухання) — час, за який звук повністю зникає після відпускання клавіші.

Цей генератор додає руху та реалістичності звуку, імітуючи природну поведінку акустичних інструментів.

5. LFO (низькочастотний осцилятор)

LFO генерує повільний повторюваний сигнал (зазвичай нижче 20 Гц) і використовується для модуляції інших параметрів, таких як:

- Pitch (вібрато)
- Filter cutoff
- Amplitude (тремоло)

LFO необхідні для створення динамічних текстур, ритмічних ефектів і тонких варіацій тону.

6. Мікшер

Мікшер – це ключовий модуль як в аналогових, так і в цифрових синтезаторах, призначений для об'єднання аудіосигналів від кількох осциляторів або джерел звуку в один композитний вихід. Тобто мікшер змішує різні форми хвиль, такі як пилкоподібні та прямокутні хвилі, для створення складніших та гармонійно багатших тембрів. Окрім внутрішньої маршрутизації сигналу, багато мікшерів також підтримують зовнішні аудіовходи, тобто мікшер інтегрується з іншими інструментами або аудіоджерелами.

7. Джерела модуляції та маршрутизація

Модуляція в синтезаторі – це процес, за допомогою якого один сигнал змінює характеристики іншого сигналу, зазвичай впливаючи на такі параметри, як частота, амплітуда або граничний рівень фільтра. У модульних і напівмодульних системах синтезу джерела модуляції, включаючи низькочастотні осцилятори (LFO), генератори огинаючої або додаткові осцилятори звукової частоти, вручну направляються до місця призначення за допомогою патч-кабелів або підключаються через попередньо визначені внутрішні сигнальні шляхи. Цей механізм полегшує генерацію складних змінних у часі керуючих сигналів, що у свою чергу синтезує змінні звукові спектри і підвищує гнучкість обробки сигналів.

Приклади:

- Модулююча висота звуку з LFO для вібрато
- Модулюючий фільтр зрізу з огинаючою для динамічної яскравості
- Використання швидкості або післядотику (у клавіатурних синтезаторах) для впливу на гучність або тембр

Модуляція вносить залежні від часу зміни до статичних аудіосигналів, що призводить до варіацій амплітуди, частоти, тембру або просторових характеристик. Ці перетворення збільшують складність сигналу та з часом створюють динамічний спектральний вміст.

8. Секвенсер або клавіатура (джерело вхідного сигналу)

- MIDI-клавіатура – надсилає інформацію про ноти та швидкість.
- Покроковий секвенсер – створює ритмічні моделі або послідовності нот.
- Контрольна напруга (CV) – в аналогових синтезаторах CV використовується для керування висотою, фільтром, амплітудою тощо.

9. Вихід / DAC (для цифрових систем)

У цифрових синтезаторах або проєктах на основі мікроконтролерів кінцевий звук має бути перетворено з цифрових даних на аналоговий аудіосигнал за допомогою цифро-аналогового перетворювача (DAC). Отриманий вихідний сигнал згодом передається на підсилювач потужності або гучномовці для акустичного відтворення.

1.2 Принцип роботи запропонованого у проєкті синтезатора

Аналоговий синтезатор функціонує за принципами субтрактивного синтезу. Його основою є генератор, керований напругою, який створює основні форми хвиль, такі як прямокутні або пилкоподібні хвилі. Частота генератора, яка визначає сприйняту висоту тону, регулюється вручну за допомогою потенціометра.

Згенерована форма хвилі обробляється низькочастотним фільтром, який послаблює високочастотні спектральні компоненти, змінюючи гармонічний склад і формуючи тембральні характеристики сигналу. Відфільтрований сигнал підсилюється лінійним підсилювальним каскадом для досягнення необхідного рівня вихідного сигналу для живлення динаміків.

Параметр синтезу, а саме амплітуда вихідного сигналу (гучність) — керуються вручну за допомогою аналогового потенціометра.

Він живиться від двополярного джерела живлення ±12 В, а вся генерація та

обробка сигналу реалізуються виключно за допомогою дискретних аналогових компонентів, включаючи транзистори, конденсатори та резистори.

1.3 Аналіз наявних рішень

Сучасний ринок синтезаторів пропонує широкий спектр рішень, що відрізняються типами генерації звуку, технічними характеристиками, гнучкістю налаштувань та інноваційними підходами до створення музики. Серед них класичні аналогові пристрої, цифрові інструменти з розширеним функціоналом, модульні системи для глибокого налаштування, а також новітні розробки з використанням штучного інтелекту. Аналіз існуючих рішень виявляє сильні та слабкі сторони кожного підходу та обґрунтовує актуальність створення синтезатора на базі штучного інтелекту, який поєднує переваги аналогового звуку та інтелектуальної генерації нот. Далі наведено кілька конкретних прикладів синтезаторів створених на базі різних плат у тому числі і Raspberry Pi, їх технічні характеристики, переваги та недоліки:

1. Синтезатор Google Magenta + Raspberry Pi (DIY-проєкт) цифровий синтезатор на основі штучного інтелекту (Magenta MusicVAE, MelodyRNN) [3]

Технічні характеристики:

- Raspberry Pi 3/4 (або Pi Zero для обмежених завдань);
- Інтеграція штучного інтелекту на основі Python ;
- FluidSynth або Sonic Pi для виведення аудіо;
- Додатковий інтерфейс MIDI та GPIO для керування;
- Потрібен інтернет для роботи штучного інтелекту в реальному часі або попередньо навчені моделі.

Переваги:

- Гнучка інтеграція MIDI;
- Модульна розширюваність обладнання;
- Підтримка багатопротокольного керування.

Недоліки:

- Проблеми із затримкою обробки за допомогою штучного інтелекту;
- Потрібен інтернет для хмарних моделей;
- Складне налаштування та залежності від програмного забезпечення.

2. Arturia MicroFreak гібридний синтезатор, має цифрові осцилятори та аналоговий фільтр[4].

Технічні характеристики:

- 25-клавішна ємнісна сенсорна клавіатура;
- 11 типів цифрових осциляторів (хвильовий, FM, Karplus-Strong тощо) Аналоговий низькочастотний фільтр 12 дБ/окт;
- Вбудований секвенсор та арпеджіатор;

Переваги:

- Унікальні моделі осциляторів та експресивні елементи керування;
- Аналоговий фільтр з цифровою гнучкістю;

Недоліки:

- Обмежена поліфонія (лише парафонічний режим).

3. Critter & Guitari Organelle M програмований цифровий синтезатор [5].

Технічні характеристики:

- Чотириядерний процесор ARM Cortex-A53;
- 1 ГБ оперативної пам'яті, 8 ГБ вбудованої пам'яті;
- Аудіовхід/вихід, MIDI, USB, WiFi;
- ¼ - дюймові роз'єми, вбудований мікрофон та динамік;
- Виконує програми або конфігурації обробки аудіо, створені в Pure. Data, Python, SuperCollider тощо.

Переваги:

- Повністю програмований та підтримує скрипти ШІ;
- Висока сумісність із зовнішніми контролерами та датчиками для розширеного жестового або алгоритмічного керування;
- Портативний, працює від батареї;

Недоліки:

- Немає аналогового каналу обробки сигналу.

Ринок синтезаторів пропонує широкий спектр рішень для різних музичних потреб та бюджетів. Вибір конкретного синтезатора залежить від характеру реалізованої архітектури синтезу (аналоговий, цифровий чи гібридний), наявності функцій та можливості розширення. Важливо враховувати не лише технічні характеристики, такі як кількість осциляторів, фільтрів та ефектів, але й зручність використання, інтерфейс та можливості для творчого самовираження.

1.4 Вимоги до проєктування

Безпека: Синтезатор повинен відповідати стандартам безпеки, щоб гарантувати відсутність ризиків для користувачів або обладнання. Це включає використання високоякісних компонентів, захист від коротких замикань, перевантаження та перегріву, а також дотримання міжнародних стандартів безпеки для електронних пристроїв.

Надійність: Синтезатор повинен стабільно виконувати свої функції протягом тривалого періоду часу без збоїв. Усі апаратні компоненти — від блоку живлення до модулів генерації та обробки звуку — повинні взаємодіяти злагоджено, без затримок, помилок обчислень та втрати даних. Програмне забезпечення має коректно виконувати запити до зовнішньої системи штучного інтелекту для отримання гармонійно структурованої музичної інформації. Система повинна бути стійкою до короткочасних збоїв, забезпечувати стабільну роботу при змінних обчислювальних навантаженнях та підтримувати відновлення функцій після порушень у роботі.

Ефективність: Синтезатор повинен генерувати звук з мінімальною затримкою та стабільною обробкою сигналу. Важливою умовою є використання оптимізованих алгоритмів розрахунків, пов'язаних з формуванням та модуляцією звукового сигналу. Крім того, пристрій працює від стаціонарного джерела живлення, споживання енергії не є критичним параметром, але доцільно використовувати енергоефективні компоненти для зменшення тепловиділення та

забезпечення загальної стабільності системи.

Функціональність: Синтезатор повинен реалізовувати всі необхідні функції для синтезу звуку та створення музики. Ці функції включають кілька генераторів сигналів, фільтри, опції модуляції та можливість інтеграції музичних послідовностей, згенерованих штучним інтелектом. Додаткові функції, такі як MIDI-підключення, програмовані користувачем патчі та інтеграція із зовнішнім аудіообладнанням, підвищать його універсальність.

Простота обслуговування: Синтезатор має бути простим в обслуговуванні та ремонті. Це включає процедури заміни таких компонентів, як кнопки, дисплеї та аудіовиходи. Докладні посібники користувача та документація щодо усунення несправностей та оновлення прошивки повинні бути доступні, щоб користувачі могли швидко діагностувати та виправити будь-які проблеми.

1.5 Формування технічного завдання

Функціональні вимоги:

1. Генерація звуку:

- Осцилятор з плавним регулюванням частоти в діапазоні 20 Гц – 5 кГц.
- Використання одного або кількох фільтрів для формування тембру.
- Реалізація ручного налаштування такого параметра, як амплітуда, за допомогою потенціометра.
- Аналогове посилення сигналу з регулюванням гучності.

2. ШІ-функціонал:

- Генерація гармонійно поєднаних послідовностей нот[7] за допомогою AI (наприклад, ChatGPT API).

3. Інтерфейси та керування:

- Десять апаратних кнопок: одна — для генерації нової послідовності, друга — для перегляду попередньої та ще вісім для нот.
- Wi-Fi — для зв’язку з хмарним AI-сервісом.
- Відображення згенерованих нот на кольоровому дисплеї через SPI.

- SPI — для підключення TFT-дисплея.
- GPIO — для керування кнопками.

4. Живлення:

- Для належного функціонування пристрою, має використовуватись зовнішне джерело постійної напруги 24 В та павербанк, або живлення від звичайного блока живлення з micro USB кабелем на 5 В.
- Загальний струм споживання не перевищує 500 мА за нормальних робочих умов, а саме якщо не викристовувати синтезатор протягом довгого часу на максимальній гучності.

5. Захисні функції:

- Захист від зворотної полярності
- Запобігання перегріву мікросхеми за допомогою температурного моніторингу Raspberry Pi. Також дана плата має пасивне охолодження включає алюмінієві або мідні радіатори, металеві корпуси та термопрокладки, які забезпечують відведення тепла без використання вентиляторів чи інших активних елементів.

6. Інтелектуальні функції:

- ШІ-зв’язок із зовнішнім сервісом через Wi-Fi.
- Відображення нотного ряду на дисплеї в зручному форматі.

Технічні вимоги:

1. Компоненти синтезу:

- Реалізація генерації звукового сигналу в межах звукової зони за допомогою аналогового генератора на базі операційного підсилювача.
- Реалізація регулювання частоти (висоти тону) шляхом перемикання постійних резисторів, що є окремим RC-ланцюгом, за допомогою кнопкової матриці.
- Забезпечення обробки сигналу в буферному каскаді для стабілізації та узгодження з навантаженням.

2. Вихідний каскад:

- Побудова підсилювача звукової частоти класу АВ на основі біполярних транзисторів.
- Забезпечення посилення сигналу до рівня, достатнього для відтворення на низькоомних динаміках для нормальної (гучної і чіткої) роботи динаміка потрібно 0,3 – 1 Вт.
- Використання діодів у колі зміщення для лінійної роботи підсилювача.

3. Дисплей:

- Виведення на дисплей акордів або нот.

4. Монтаж:

- Усі електронні компоненти повинні бути змонтовані друкованій платі для забезпечення зручного доступу та стабільної роботи.

5. Енергоспоживання:

- Схема синтезатора живитися від джерела 24 В постійної напруги, а мікроконтролер має живитись або від повербанку або блока живлення з micro USB на 5 В.
- Максимальний споживаний струм не повинен перевищувати 600 мА.

Експлуатаційні вимоги:

1. Діапазон робочих температур:

- Робочий діапазон температур: від 0°C до +85°C

2. Вологість:

- Відносна вологість повітря - до 85% за температури +25°C без конденсації.

3. Умови використання:

- Пристрій призначений для використання в сухих, закритих приміщеннях, захищених від вологи, прямих сонячних променів та механічних пошкоджень.

Висновок до розділу 1

У результаті проведеного теоретичного аналізу детально розглянуто принципи синтезу звуку, зокрема аналогового субтрактивного синтезу, який є основою для гнучкої генерації тембру шляхом формування форми хвилі та фільтрації. На основі проведеного аналізу визначено основні принципи і вимоги до формування і обробки звукових сигналів.

Досліджено основні типи синтезаторів та їх функціональні компоненти, включаючи осцилятори, фільтри, генератори обвідної та джерела модуляції. Аналіз показав, що субтрактивний синтез залишається одним із найбільш актуальних і широко застосовуваних методів звукового синтезу на сьогодні, завдяки своїй гнучкості, простоті реалізації в аналогових схемах та великому творчому потенціалу при створенні унікальних тембрів.

Проведено порівняльний аналіз існуючих технічних рішень, що включає комерційні синтезатори та реалізації з відкритим кодом на базі Raspberry Pi. Виявлено основні недоліки сучасних підходів: проєкти на основі Google Magenta характеризуються високою затримкою; Arturia MicroFreak обмежується парафонічним режимом роботи, тобто всі ноти обробляються "разом", що обмежує виразність звуку; Critter & Guitari Organelle M втрачає переваги аналогової обробки сигналу.

В результаті зроблене технічне завдання, що визначає основні параметри, особливості та структуру запропонованого у даній роботі технічного рішення для генераціх аудіпослідовностей.

РОЗДІЛ 2. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

Розділ у якому проведено створення та аналіз структурної схеми. Розписано взаємодію блоків структурної схеми один з одним. Та обрано елементу базу для розробки, а також створено схему електричну принципову.

2.1 Розробка структурної схеми пристрою

Структурну схему синтезатора продемонстровано на рис. 2.1.

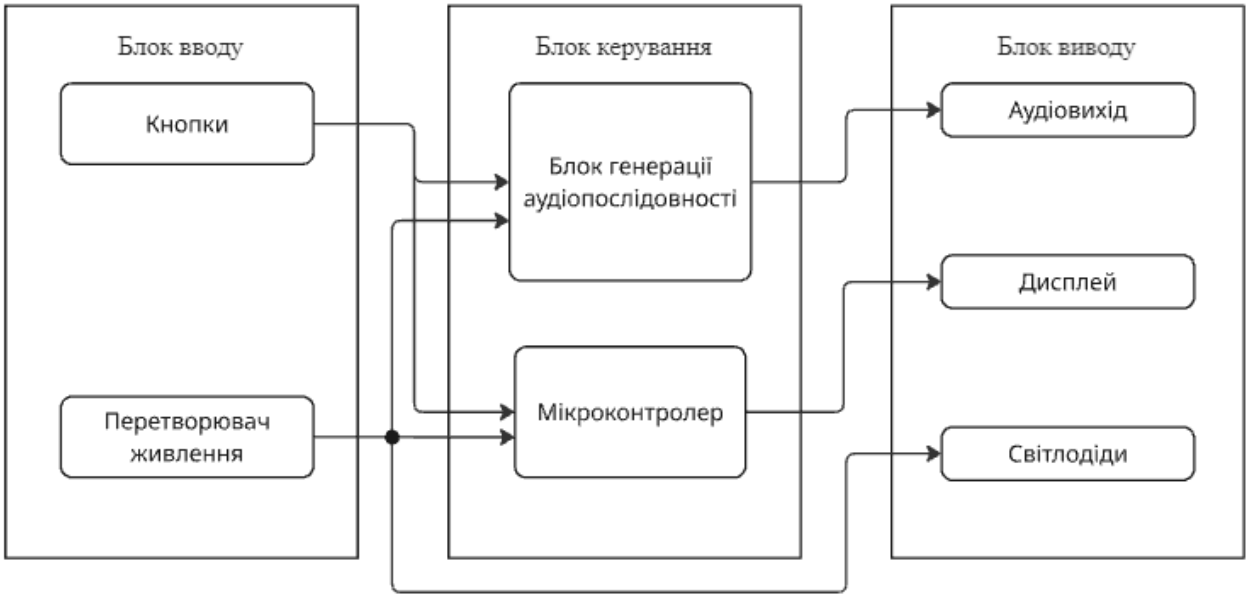

Рисунок 2.1 – Структурна схема пристрою

Схема включає три частини:

1. Блок вводу
2. Блок керування
3. Блок виводу

Блок вводу. Складається з системи керування, живлення від повербанку та перетворювача живлення. Керування відбувається за допомогою кнопок, 8 кнопок які відповідають за різні ноти та 2 кнопки керування мікроконтролером для зміни гармонійної послідовності, що відображаться на дисплеї.

Перетворювач живлення трансформує однополярну напругу в двополярну, що дозволяє отримати симетричну напругу від одного джерела живлення. Основою схеми є операційний підсилювач, який формує керуючий сигнал для

двотактного підсилювача на транзисторах. За допомогою заряджених електролітичних конденсаторів та діодів на виході створюється позитивна та негативна гілки напруги відносно спільного нуля.

Загалом, блок вводу пристрою відповідає за контроль вхідних даних, а також за живлення самого пристрою, забезпечуючи його нормальну роботу.

Блок керування. Функціональне призначення цього блоку полягає в інтерпретації вхідних даних від кнопок та їх перетворенні на звукові частоти. В основі лежить аналоговий генератор звукових сигналів на операційних підсилювачах, що виконує роль перетворювача. Частота генерації цього пристрою регулюється напругою, яка формується за допомогою кнопок. Кожна кнопка оснащена резистором певного номіналу, що забезпечує унікальну напругу, необхідну для генерації конкретної ноти. Згенерований сигнал, після цього, подається на двотактний підсилювач потужності на транзисторах для посилення, і фінальний звуковий вихід надходить на динамік.

До складу доного блоку входить мікроконтролер, який відповідає за генерацію гармонійно поєднаних між собою нот, а саме робить запити до штучного інтелекту, щоб він згенерував послідовність нот, а далі згенерована послідовність нот передається на мікроконтролер з подальшим виведенням інформації на дисплей.

Блок виводу. Цей блок включає в себе TFT дисплей, світлодіоди та динамік для виведення послідовності нот та відтворення звуку відповідно.

Дисплей відображає гармонійно пов'язану послідовність нот, створену штучним інтелектом. Дисплей підключений до мікроконтролера за допомогою інтерфейсу SPI, що забезпечує високу швидкість передачі даних та надійне з'єднання. На відміну від I2C, SPI використовує окремі лінії для кожної функції (MOSI, MISO, SCLK, SS), що дає змогу досягати кращої продуктивності, особливо при роботі з графікою або швидко змінюваною інформацією на дисплеї.

Для відтворення звуку використовується динамік, на який подається аудіосигнал. Перед подачею на динамік сигнал проходить через підсилювальний

каскад на основі операційних підсилювачів, що забезпечує достатню амплітуду, а саме ±10В для якісного звуку. Завдяки використанню аналогового підсилювача забезпечується висока чіткість та гучність звуку, що дозволяє користувачам не тільки бачити, але й чути результат роботи системи.

Завдяки даним компонентам, блок виводу дає можливість користувачу, бачити гармонійно поєднану послідовність на дисплеї та чути аудіосигнали за допомогою динаміка.

2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази

Перед початком виконання електричної принципової схеми необхідно визначити елементну базу, яка забезпечить працездатність пристрою та його відповідність поставленому завданню.

Компоненти необхідні для розробки:

- Мікроконтролер для зв’язку із штучним інтелектом в онлайн режимі, а також для керування і відображення інформації на дисплей;
- Резистори для обмеження струму, задання коефіцієнтів операційного підсилювача, розділення вхідних сигналів та потенціометр для регулювання гучності звуку;
- Конденсатори для фільтрації живлення та пульсацій;
- Елементи керування для взаємодії з генератором тактових сигналів та платою;
- Операційні підсилювачі які використовуються для генерації прямокутних сигналів, та для керуванням базами транзисторів а також для стабілізації сигналу та у подальшому переведення його на транзистори;
- Діоди для захисту живлення а також світлодіоди для індикації стану;
- Транзистори для подачі перетвореної стабілізованої напруги, один тразистор передає +12 В а інший –12 В а також для підсилення сигналу та у подальшому виведення його на динамік;
- Дисплей для виведення даних з мікроконтролера;

- Динамік для відтворення аналогового сигналу;
- Роз’єми для підключення живлення та динаміка;

2.3 Вибір мікроконтролера

Для реалізації генерації гармонійно поєднаної нотної послідовності з відображенням на дисплей у даному проєкті вирішено обрати лінійку мікроконтролерів Raspberry Pi. Це універсальні платформи, що поєднують високу гнучкість, продуктивність та широкі можливості інтеграції. Вони стали популярними в інженерних, освітніх та дослідницьких проєктах завдяки своїй доступності, відкритій екосистемі та активній спільноті.

Потужність та продуктивність: Плати Raspberry Pi мають процесори ARM з частотою від 700 МГц до 1,5 ГГц і можуть бути оснащені до 8 ГБ оперативної пам'яті в залежності від моделі. Цього достатньо для запуску повноцінної операційної системи Linux та виконання складних програм - включно з обробкою штучного інтелекту, генерацією музики, аналізом даних тощо. Це суттєва перевага порівняно з класичними мікроконтролерами, такими як Arduino, які не можуть працювати з такими обсягами даних або складним програмним забезпеченням.

Raspberry Pi Zero WH оснащений процесором Broadcom BCM2835 з тактовою частотою 1 ГГц та 512 МБ оперативної пам'яті, що дозволяє йому виконувати запити генерації послідовностей за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. На відміну від Arduino Uno або STM32, які не мають достатніх ресурсів для обробки нейронних мереж, Pi Zero WH підтримує запуск скриптів Python, бібліотек штучного інтелекту (наприклад, TensorFlow Lite, Magenta) та працює під управлінням повноцінної ОС Linux.

Підтримка різних інтерфейсів: Вся лінійка Raspberry Pi підтримує велику кількість інтерфейсів — GPIO, I2C, SPI, UART, HDMI, USB, CSI та інші, що дозволяє легко підключати дисплеї, датчики, камери, аудіопристрої та периферійні пристрої. Плата також оснащена портами для підключення Wi-Fi та Bluetooth, що відкриває можливості для бездротового керування або оновлення.

Надійність та довговічність: Raspberry Pi відома своєю винятковою

стабільністю в роботі, що підтверджується роками її використання в різноманітних проєктах, від освітніх до промислових систем. Висока якість збірки цих одноплатних комп'ютерів, поєднана з широкою технічною підтримкою з боку Raspberry Pi Foundation, забезпечує їхню довговічність.

Завдяки відкритому програмному забезпечення та ретельно задокументованій апаратній частині, користувачі мають повний контроль над системою, що дозволяє адаптувати її під найвибагливіші потреби. Активна та чисельна спільнота користувачів, яка налічує мільйони ентузіастів та розробників по всьому світу, є величезним ресурсом, що дозволяє швидко знаходити рішення для більшості типових задач та викликів.

Тривалий життєвий цикл продуктів Raspberry Pi, який часто сягає 10 років і більше для певних моделей (наприклад, деякі моделі Raspberry Pi 3 та CM3+ до 2026 року), окупає початкові інвестиції та робить їх ідеальним вибором для довгострокових проєктів. Сумісність з широким спектром версій операційної системи Linux, зокрема з оптимізованим для неї Raspberry Pi OS (раніше Raspbian), дозволяє створювати довготривалі та легко масштабовані рішення, що можуть розвиватися разом з потребами проєкту. Це забезпечує гнучкість та актуальність пристрою протягом багатьох років після його розробки.

У запропонованому проєкті для генерації гармонійно поєднаної послідовності нот та виведення їх на дисплей, я обрав мікроконтролер Raspberry Pi Zero WH 5 (512MB) [6]. Це рішення базується на поєднанні компактності та достатньої обчислювальної потужності. Порівняно з альтернативними мікроконтролерами та одноплатними комп'ютерами, ця плата забезпечує оптимальний баланс між ціною, функціональністю та енергоефективністю.

Плата Raspberry Pi Zero WH вирізняється високою надійністю та довговічністю завдяки якісному виготовленню та широкій перевіреності в різних сферах — від освітніх до промислових застосувань. Компоненти на платі розраховані на тривалу безперервну роботу, з типовим середнім напрацюванням на відмову понад 100 000 годин при коректних умовах експлуатації (відповідне

живлення, охолодження, відсутність надмірної вологості чи пилу).

Легкість у використанні: Однією з важливих переваг плати Raspberry Pi Zero WH, є простота використання. Плата вже має припаяні роз'єми GPIO, що значно спрощує підключення периферійних пристроїв без потреби в додатковій пайці. Крім того, для роботи достатньо завантажити офіційну операційну систему Raspberry Pi OS на карту пам’яті, після чого плата готова до використання без складних налаштувань. Вона підтримує підключення до ПК через USB OTG або SSH, що полегшує віддалене програмування та налагодження. Така простота інтеграції робить Raspberry Pi доступним навіть для користувачів із базовими навичками електроніки чи програмування.

2.4 Вибір операційного підсилювача

У схемотехнічному проєктуванні синтезатора важливо забезпечити якісне формування, буферизацію та посилення сигналу, що подається на динамік. Центральною ланкою в цьому процесі є операційний підсилювач (ОП), який використовується для реалізації генератора (осцилятора), буферного каскаду та попереднього підсилення.

Оскільки аудіосигнал повинен мати мінімальні спотворення, низький рівень шуму та стабільну амплітуду, операційний підсилювач у пристрої повинен відповідати наступним основним вимогам:

- Низький рівень шуму (менше 10 нВ/√Гц);
- Рівень наростання сигналу (slew rate ≥ 10 В/мкс) — для збереження форми сигналу;
- Низький рівень гармонійних спотворень (THD);
- Широкий діапазон живлення (щоб працювати при ±12 В);
- Високий вхідний імпенданс та низький вихідний імпенданс — для правильного узгодження каскадів;
- Доступність та стабільність роботи в аудіодіапазоні (20 Гц – 20 кГц).

З урахуванням вищезазначених вимог проведено порівняння популярних моделей операційних підсилювачів, які потенційно можуть бути використані в схемотехнічному дизайні.

Таблиця 2.1 – Порівняння операційних підсилювачів.

Модель	Напруга живлення, В	Шум, нВ/√Гц	Slew Rate, В/мкс	THD, %	Примітки
TL072	±3 … ±18	18	13	0,003	Низькошумовий, дешевий, стабільний
NE5532	±3 … ±20	5	9	0,0005	Висока якість звуку, середня ціна
LM358	3 … 32 (однополярне)	40	0,3	0,01	Дешевий, шумний, повільний
OPA2134	±2,5 … ±18	8	20	0,00008	Професійний аудіо ОП, дорогий
TL074	±3 … ±18	18	13	0,003	Аналог TL072 з чотирма ОП в корпусі

TL072 [8] обрано для реалізації аудіосигнальної частини синтезатора, оскільки він:

- Забезпечує достатню швидкість та низький рівень шуму для аудіо;
- Сумісний з двополярним джерелом живлення ±12 В;
- Має доволі низький рівень гармонійних спотворень порівняно з іншими ОП;
- Рівень наростання сигналу відповідає поставленим вимогам.

Тож у даному проєкті буде використаний операційний підсилювач TL072QDREP. Цей вибір дозволяє досягти балансу між якістю, надійністю та вартістю.

2.5 Вибір дисплею

У цьому проєкті дисплей виконує функції виведення послідовності нот згенерованої штучним інтелектом. Відображення графічної інформації — зокрема, назви та їх гармонічного порядку — має бути контрастним, чітким та швидким для зручності взаємодії користувача з пристроєм у режимі реального часу. Саме тому до вибору дисплея були висунуті такі вимоги:

- Висока контрастність та яскравість;

- Читабельність під іншими кутами;
- Роздільна здатність 128x160 для нормального відображення тексту та простої графічної інформації без розмитості;
- Сумісність з інтерфейсом SPI;
- Компактні розміри для портативного пристрою;
- Низьке енергоспоживання.

Для порівняння обрано декілька дисплеїв, а саме: TFT IPS LCD 1.8" [9], OLED 0,96" I2C, LCD 1602, TFT 2.4" Touch. Далі наведена таблиця для порівнянь.

Таблиця 2.2 – Порівняння аналогів дисплеїв.

Параметр	**TFT IPS 1.8" SPI**	**OLED 0.96" I2C**	**LCD 1602**	**TFT 2.4" Touch**
Тип матриці	IPS	OLED	TN	TFT
Інтерфейс	SPI	I2C	I2C	SPI
Кольоровість	262K кольорів	Монохромний	Монохромний	262K кольорів
Кут огляду	170°	160°	60°- 90°	150°
Яскравість та контраст	Висока	Дуже висока	Низька	Висока
Розмір	1,8"	0,96"	2x16 символів	2,4"
Споживання енергії	20-30 мА	10-15 мА	1-3 мА	60-90 мА
Вартість	Низька (~100 грн)	Середня (~150–200 грн)	Низька (~70 грн)	Вища (~250–400 грн)
Підтримка графіки	Повна	Часткова	Немає	Повна

TFT IPS 1.8" SPI обрано для реалізації преєкту, оскільки він має такі характеристики як:

- Кут огляду 170◦ завдяки IPS-матриці;
- Компактний розмір, зручний для невеликих пристроїв;
- Низьке енергоспоживання (20–30 мА);
- Швидкий SPI-інтерфейс для швидкого оновлення даних;
- Доступна ціна з оптимальними характеристиками;

Враховуючи ці критерії, для реалізації обрано 1,8-дюймовий TFT IPS LCD дисплей з інтерфейсом SPI. Цей дисплей поєднує в собі хорошу якість зображення, низьку вартість та компактність, що робить його оптимальним для даного проєкту.

2.6 Вибір кнопок для керування

Для реалізації нотних клавіш використано вісім механічних кнопок Tact Switch розміром 6×6×5 мм, призначені для генерації різних нот або акордів, що дозволяє користувачеві взаємодіяти з синтезатором. Ще дві кнопки також Tact Switch, але розміром 6×6×12 мм, відповідають за маніпулювання мікроконтролером, одна генерує нову нотну послідовність, а інша виводить попередню. Напрацювання на відмову відповідно до інформації наданої виробником складає 250000 натискань.

2.7 Вибір блока живлення для синтезатора

Для живлення синтезатора в даному проєкті необхідне стабільне двополярне живлення ±12 В, що є необхідним для коректної роботи аналогових каскадів на операційних підсилювачах. Таке живлення забезпечує симетричну амплітуду аудіосигналу, необхідну для якісного звукового відтворення без спотворення. Крім того, система повинна бути енергоефективною, безпечною та зручною в інтеграції у вбудовані пристрої.

Оскільки більшість доступних імпульсних джерел живлення на ринку однополярної напруги (наприклад, 24 В), у схемі був передбачений окремий DC/DC перетворювач, який з 24 В формує необхідне двополярне живлення ±12 В. Такий підхід дозволяє використовувати компактні джерела живлення, спрощує систему електроживлення та завершує її гнучкість.

Основні характеристики блоку живлення:

- Вхідна напруга 100–240 В AC;
- Вихідна напруга 24 В DC;
- Максимальний струм до 2 А;
- Коефіцієнт корисної дії до 90%;
- Захисти від перенапруги, короткого замикання, перевантаження, перегріву;
- Пасивне охолодження.

Зовнішнім джерелом живлення для даного проєкту було обрано Mean Well HDR-60-24. Він має універсальний вхід з діапазоном напруги від 85 до 264 В та забезпечує стабільну вихідну напругу 24 В при максимальному струмі до 2,5 А. Загальна вихідна потужність становить 60 Вт, а ККД сягає 91%, що робить його енергоефективним. Пристрій оснащений захистом від перенапруги, короткого замикання, а також перевантаження. Має пасивне охолодження, тому пристрій працює абсолютно безшумно. Крім того, пристрій має повний комплект вбудованих захистів та сертифікований за міжнародними стандартами, що гарантує надійність та безпечну експлуатацію.

А також для живлення мікроконтролера необхідне окреме джерело постійної напруги на 5 В. Це може бути будь-який повербанк з кабелем micro USB для підключення до самого мікроконтролера.

Висновок до розділу 2

У даному розділі проаналізовано структурну схему синтезатора, визначено функціональне призначення основних блоків системи – вхідного, керуючого та вихідного, а також обґрунтовано вибір елементної бази для реалізації кожного з них.

Обрано мікроконтролер Raspberry Pi Zero WH, який забезпечує достатню обчислювальну потужність для генерації нот за допомогою запитів до штучного інтелекту. Для відображення інформації на екрані обрано компактний та енергоефективний TFT IPS дисплей з інтерфейсом SPI, що гарантує високу якість зображення. Як основу аналогової частини синтезатора використано операційний підсилювач TL072QDREP, що забезпечує низький рівень шуму, достатню швидкість наростання напруги та відповідність вимогам аудіосигналу. Для керування пристроєм використано десять кнопок типу Tact Switch, з яких вісім відповідають за генерацію, а дві – за маніпулювання мікроконтролером. Для стабільного живлення аналогових каскадів обрано імпульсне джерело живлення Mean Well HDR-60-24 у поєднанні з DC/DC перетворювачем, що забезпечує двополярну напругу ±12 В. Аналіз та вибір компонентів дозволяє досягти

надійності, енергоефективності та функціональної повноти системи.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛУ

Цей розділ описує основні обрані показники для створення друкованої плати(ДП). Такі як: тип, клас точності монтажу, метод виготовлення ДП та розташування елементів на монтажній поверхні. А також проєктування друкованої плати у програмному забезпеченні Altium Designer.

3.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати

Друковані плати є фундаментальною основою сучасної електроніки, слугуючи платформою для встановлення та з'єднання електронних компонентів. Класифікація плат здійснюється за кількістю провідних шарів та їх конфігурацією.

Одношарові друковані плати характерні наявністю провідників виключно на одній поверхні діелектричної підкладки. Їхні переваги полягають у низькій вартості та простоті виготовлення завдяки мінімальній кількості матеріалів та технологічних операцій. Проте такі плати мають суттєві обмеження щодо реалізації складних схем та чисельності компонентів. Крім того, розміщення всіх провідників в одній площині підвищує ймовірність виникнення електромагнітних перешкод. Застосовуються такі плати переважно у простих електронних виробах - від побутових калькуляторів до базових термометрів та реле, а також при створенні експериментальних зразків.

Двошарові друковані плати мають провідну структуру на обох поверхнях основи. Такий підхід суттєво підвищує щільність компонування та покращує характеристики з'єднань, спрощує проєктування провідних доріжок та дозволяє оптимізувати габарити готового виробу. Двошарові плати демонструють вищу універсальність порівняно з одношаровими аналогами, забезпечуючи кращу компактність розташування елементів, поліпшену передачу сигналів та зниження рівня електромагнітних завад завдяки розподілу провідників по різних рівнях. Сфера їх застосування охоплює широкий спектр електронної техніки - від персональних комп'ютерів та смартфонів до телевізійного обладнання, аудіовізуальних систем, медичної апаратури та автомобільної електроніки.

Багатошарові друковані плати включають три або більше провідних рівнів,

розділених діелектричними прошарками. Вони призначені для реалізації надскладних пристроїв, що потребують максимальної щільності розміщення компонентів. Виробництво таких плат вимагає значних технологічних ресурсів та висококваліфікованого персоналу з використанням спеціалізованого устаткування. Багатошарова архітектура забезпечує досягнення надвисокої щільності монтажу при реалізації складних електричних рішень, що покращує ключові параметри - управління енергоспоживанням, швидкодію та електромагнітну сумісність. Такі плати знаходять застосування у високотехнологічних сферах - серверному обладнанні, мережевих комутаторах, преміальних мобільних пристроях, медичній техніці, аерокосмічній та оборонній промисловості, забезпечуючи виняткову функціональність та надійність складних електронних комплексів.

Окремо варто відзначити гнучкі друковані плати, здатні до деформації та згинання. Вони використовуються у сенсорних панелях, носимій електроніці та медичних імплантатах.

Аналізуючи специфіку різних типів плат, для даного проєкту оптимальним рішенням стане двошарова друкована плата, яка забезпечить потрібний баланс гнучкості, функціональності та надійності для втілення складних схемотехнічних рішень з великою кількістю компонентів.

Матеріальна база друкованих плат варіюється залежно від вимог до механічних, електричних та теплових властивостей. Основний спектр матеріалів включає FR-4, керамічні композити, поліімідні сполуки та інші спеціалізовані матеріали. Домінуючим матеріалом залишається FR-4 - композит на основі епоксидної смоли з армуванням скловолокном.

Матеріал FR-4 демонструє ряд переваг, що включають підвищену механічну міцність, відмінні електротехнічні параметри, термостійкість та захист від вологи [10]. Його економічна доступність та широка розповсюдженість роблять FR-4 першочерговим рішенням для переважної більшості електронних розробок.

Ключові технічні параметри FR-4:

- **Електрична ізоляція:** діелектрична міцність перевищує 20 кВ/мм, гарантуючи ефективне розділення електричних контурів та запобігання пробоям.
- **Гігроскопічність:** показник поглинання вологи утримується в межах 0,10%, що забезпечує незмінність електричних властивостей навіть за умов високої вологості навколишнього середовища.
- **Термічна витривалість:** робочий температурний діапазон досягає 130°C, що дозволяє застосовувати матеріал у пристроях з інтенсивним тепловиділенням.
- **Структурна надійність:** високий опір механічним деформаціям гарантує довготривалу роботу та механічну надійність конструкції плати.
- **Температурні деформації:** коефіцієнт лінійного розширення 14-17 ppm/°C гарантує мінімальні геометричні зміни при температурних коливаннях.
- **Хімічна інертність:** стійкість до широкого спектру агресивних речовин розширює можливості застосування в несприятливих умовах.

Для запропонованого проєкту FR-4 є найбільш раціональним рішенням завдяки оптимальному поєднанню механічних та електричних характеристик, необхідних для стабільної роботи в різних умовах експлуатації. Використання цього матеріалу забезпечить створення високонадійної платформи з тривалим терміном служби, що гарантує безперебійну роботу всіх інтегрованих компонентів системи.

3.2 Вибір та обґрунтування методу виготовлення друкованої плати

У сфері виробництва друкованих плат застосовуються три основні технологічні підходи: хімічний (субтрактивний), електрохімічний (адитивний) та комбінований методи. З урахуванням специфіки розроблюваного проєкту обрано обмежений комбінований позитивний технологічний процес виготовлення.

Даний технологічний підхід демонструє найкращу ефективність при створенні двошарових друкованих плат завдяки можливості формування чітких провідних доріжок при значно меншій трудомісткості порівняно з

електрохімічним способом. Комбінований позитивний метод забезпечує підвищену надійність кінцевого продукту, оскільки діелектрична основа знаходиться у захищеному стані, екранована металевою фольгою від агресивного впливу електролітичних розчинів.

Ключові переваги обраного методу:

Виключення ризику пошкодження контактних площадок під час механічного свердління отворів та відсутність потреби у спеціалізованому устаткуванні для металізації свердлінь. Електричні параметри готових плат суттєво покращуються завдяки мінімізації впливу хімічно активних речовин на діелектричну підкладку та посиленню адгезії між фольгою та основою.

Технологічні обмеження:

Метод характеризується обмеженою роздільною здатністю через значну глибину технологічної обробки та звуженим спектром доступних рішень для обробки зображень на фоторезистивному покритті.

Порівняльний аналіз альтернативних методів:

Електрохімічний підхід відзначається низькою міцністю з'єднання провідників з основою плати та обмеженими можливостями відтворення мініатюрних провідних елементів. Хімічний метод супроводжується нераціональним використанням технологічних розчинів та реактивів.

У рамках поточного технічного завдання комбінований позитивний технологічний процес представляє найраціональніше рішення, що забезпечує оптимальне співвідношення між якісними характеристиками, експлуатаційною надійністю та технологічною простотою реалізації виробничого процесу.[11]

3.3 Вибір та обґрунтування класу точності друкованої продукції

Точність виробництва друкованих плат визначається сукупністю технологічних факторів і безпосередньо впливає на критичні геометричні параметри компонентів – мінімальні розміри провідних доріжок та міжелементних зазорів топологічного малюнка. Вибір відповідного класу точності здійснюється індивідуально для кожного виробничого процесу з дотриманням нормативних

вимог чинних стандартів.

Основним параметром друкованої плати є клас точності, він встановлює номінальні межі, мінімальні та максимальні допустимі значення для всіх елементів топології та конструктивних характеристик плати, включаючи діаметри монтажних отворів та габаритні розміри виробу.

У процесі проєктування та технологічних розрахунків критично важливо враховувати граничні параметри елементів друкованої плати, враховуючи потенційні відхилення під час їх виконання. Максимальні та мінімальні значення параметрів кріплення, що враховують як особливості самого процесу кріплення, так і технологічно допустимі відхилення, систематизовані у відповідних довідкових таблицях: Таблиця 3.1 - Критичні межі основних технічних характеристик друкованих плат, Таблиця 3.2 - Допустимі похибки виробництва деталей друкованих з'єднань. Ці нормативні дані служать основою для забезпечення технологічної реалізованості проєкту та гарантування якості кінцевого продукту.

Таблиця 3.1 – Критичні межі основних технічних характеристик друкованих плат

Параметр	**Позначення, мм**	**клас**				
		1	**2**	**3**	**4**	**5**
Ширина друкованого провідника	t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Відстань між краями Елементів провідникового рисунка	S	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Гарантійна смужка	b	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
Відношення номінального діаметра найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати	f	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Таблиця 3.2 - Допустимі похибки виробництва деталей друкованих з'єднань

Похибка	**Позначення**	**Максимальне значення, мм**
Зміщення провідників відносно ліній КС	$\delta_{см}$	0,05
Розташування отворів (всіх) відносно вузлу КС	$\delta_{о}$	0,07
Розташування КМ відносно вузлу КС	$\delta_{км}$	0,015(0,05)
Фотокопії та фотошаблону	$\delta_{фф}$	0,06
Розташування КМ відносно вузлу КС на фотошаблоні	$\delta_{фш}$	0,5

Для виготовлення друкованих плат 5-ого класу точності необхідно використовувати спеціалізоване технологічне обладнання, застосовувати високоякісні матеріали та організувати стерильне виробниче середовище з контрольованими атмосферними параметрами.

Для виготовлення друкованих плат 4-ого класу також потрібне використання високоточної техніки, проте технічні вимоги до матеріальної бази, виробничого обладнання та умов технологічного процесу дещо м'якші відповідно до п'ятого класу точності.

Друковані плати 3-ого класу є найбільшим практичним застосуванням завдяки оптимальному балансу між високою щільністю трасування компонентів та можливістю виготовлення з використанням стандартного промислово наданого обладнання загального призначення.

Друковані плати 2-ого та 1-ого класів орієнтовані на використання в простих електронних пристроях з вищою щільністю компонентів та менш критичними вимогами до мініатюризації.

Враховуючи специфіку розробленої схеми, яка передбачає інтеграцію компонентів у корпуси поверхневого монтажу та орієнтована на досягнення

високої точності параметрів друкованої плати, оптимальним технічним рішенням для цього проєкту є вибір четвертого класу точності виготовлення.

3.4 Проєктування друкованої плати в середовищі Altium Designer

Altium Designer – це програмне забезпечення для створення електронних систем та друкованих плат, яке має широке застосування в промисловості, науці та інших технічних галузях. Технологічний процес проєктування друкованих плат у Altium Designer включає в себе такі послідовні етапи: [12]

1. Створення проєкту: Запуск програмного середовища Altium Designer з подальшим створенням нового проєкту, визначенням типу плати, що розробляється, та формуванням відповідного конструкторського документа.
2. Схематичне проєктування: Створення електричної принципової схеми використовуючи вбудований редактор з подальшою перевіркою на правильність та повноту всіх компонентів.
3. Розмітка плати: Просторове розміщення електронних компонентів на поверхні друкованої плати з урахуванням структурних та функціональних вимог.
4. Трасування з'єднань: Проєктування провідних шляхів для забезпечення електричних з'єднань між компонентами відповідно до принципової схеми.
5. Верифікація проєкту: Комплексна перевірка готового проєкту на відповідність технічним вимогам, правильність створення та наявність усіх окремих елементів у системі живлення.
6. Підготовка виробничої документації: Формування повного комплекту технологічних файлів, деяких для промислового створення друкованих плат, використовуючи спеціалізовані функції програми Altium Designer.

У даному дипломному проєкті прийнято рішення використовувати четвертий клас точності, щоб спроєктувати друковану плат, що забезпечує оптимальний баланс між технічними характеристиками та технологічною доцільністю проєкту.

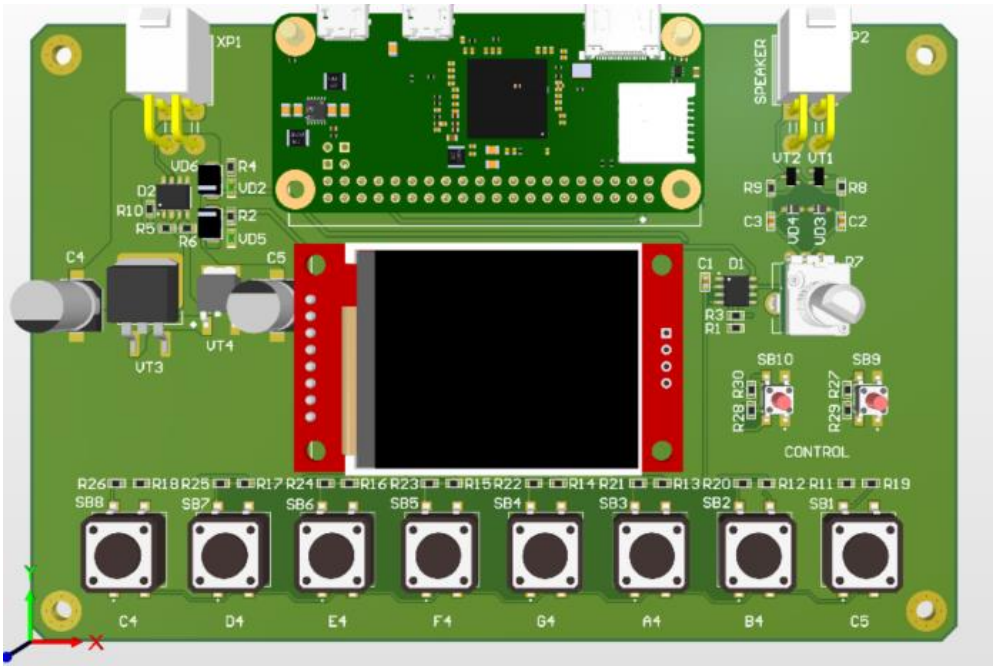

Рисунок 3.1 – вигляд ДП у 3D виді зверху

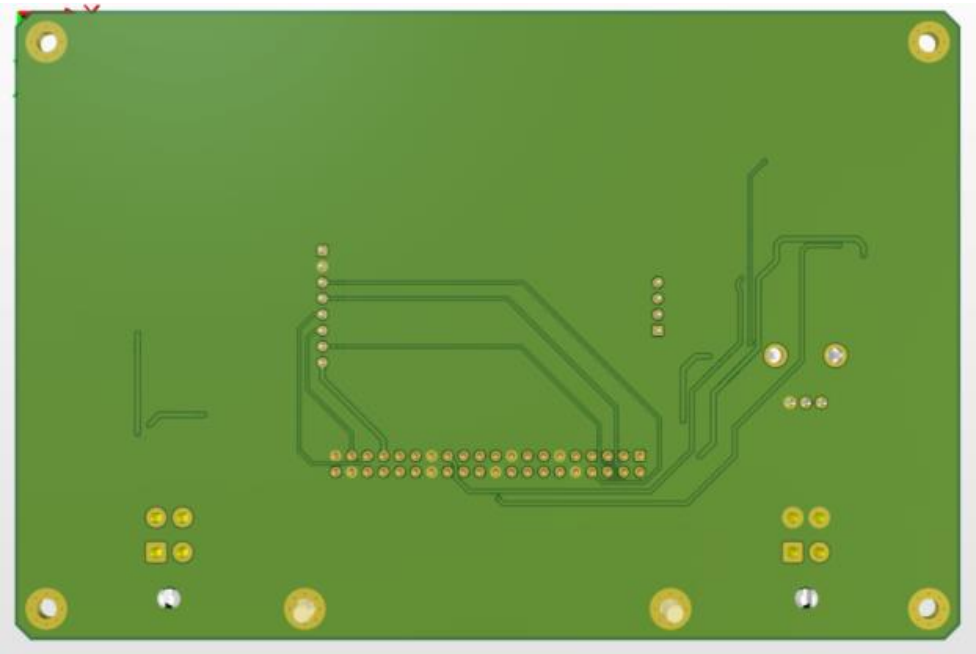

Рисунок 3.2 – вигляд ДП у 3D виді знизу

Висновок до розділу 3

На основі виконаного дослідження технологічних особливостей проєктування друкованих плат визначено комплексний підхід до вибору матеріалів, класу точності та методів виготовлення для розроблюваного синтезатора звуку.

Дослідження властивостей діелектричних матеріалів підтвердило доцільність застосування FR-4 як базового матеріалу, що забезпечує необхідний рівень електричних та механічних характеристик при оптимальному співвідношенні вартість-якість. На основі технічного аналізу класів точності виготовлення четвертий клас визначено як найкраще рішення для проєкту, що передбачає використання компонентів поверхневого монтажу.

Аналіз технологічних методів виробництва друкованих плат визначив переваги комбінованого позитивного методу, що забезпечує необхідну якість при прийнятній складності виготовлення. Прийняті технічні рішення створюють надійну технологічну основу для реалізації проєкту синтезатора звуку з урахуванням сучасних вимог до електронних пристроїв та промислових стандартів виробництва.

Розділ 4. РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ

4.1 Конструкторсько-технологічний розрахунок елементів ДП

4.1.1 Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струму для ланцюгів живлення і землі

Щоб розрахувати мінімальну ширину провідника b_{minI}(мм) у ланцюгах живлення і землі визначається за формулою 4.1:

$$b_{min\,I} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}}, \quad (4.1)$$

де I_{max} – максимальний струм у електричному колі, А;

$j_{доп}$ – граничне значення густини для друкованих плат, виготовлених комбінованим позитивним способом;

$t_{пров}$ - товщина провідникового шару, мм.

Згідно з ОСТ 4.010.022-85 для плати, створеної комбінованим позитивним методом, граничне значення $j_{доп} = 48\ \frac{А}{мм^2}$

Щоб обчислити товщини друкованого провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, застосовують формулу 4.2:

$$t_{пров} = h_{ф} + h_{гм} + h_{хм}, \quad (4.2)$$

де $h_{ф}$ – товщина фольги, $h_{ф}$= 0,035 мм;

$h_{гм}$ – товщина шара гальванічно осадженої міді, $h_{гм}$ = 0,055 мм;

$h_{хм}$ – товщина шара хімічно осадженої міді, $h_{хм}$ = 0,0065 мм.

$$t_{пров} = 0{,}035 + 0{,}055 + 0{,}0065 = 0{,}0965\ (мм)$$

Наступним кроком є визначення параметру I_{max}, який є сумою споживаних струмів усіх активних елементів схеми. Їх значення занесено та представлено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Споживання струмів активних елементів

Компонент	Кількість	I, мА
Raspberry Pi Zero WH	1	200
TL072QDREP (J-FET ОП)	1	2,5
LM358MX/NOPB (ОП)	1	3
BC817-16 (NPN)	1	25
BC807-40CLT1 (PNP)	1	25
MJB44H11T4-A (NPN)	1	200
MJD45H11T4 (PNP)	1	200
LED Green 0603	2	40
MMDL914T1G	2	1
S1A-E3/61T	2	1

Як результат, маємо:

$$I_{max} = 200 + 2{,}5 + 3 + 25 + 25 + 200 + 200 + 40 + 1 + 1 = 697{,}5 \text{ (мА)}$$

Для розрахунку мінімальної ширини друкованого провідника $b_{min\,I}$, враховуючи всі параметри, використаємо формулу 4.1:

$$b_{min\,I} = \frac{I_{max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0{,}6975}{48 \cdot 0{,}0965} \approx 0{,}1506 \text{ (мм)}$$

При порівнянні отриманого значення $b_{min\,I}$ з мінімальною шириною провідника 4 класу точності, $b_{\text{пр}}{}^{r} = 0{,}15$, видно що отримане значення дуже наближене до даного. Тому за оптимальне значення ширини провідника на постійному струмі для кола живлення та «землі» враховуємо 0,15 мм.

4.1.2 Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому

Враховуючи допустимий рівень падіння напруги визначимо мінімальну ширину провідника за формулою 4.3:

$$b_U = \frac{p \cdot I_{max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}}, \quad (4.3)$$

де ρ – питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним

методом, $\rho = 0{,}0175\ \frac{\text{Ом}*\text{мм}^2}{\text{м}}$

$L_{\text{пров}}$ – довжина найдовшого друкованого провідника на ДП, $L_{\text{пров}}$= 120 мм

$U_{\text{доп}}$ – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику, $U_{\text{доп}}$ =0,05 · $E_{ж}$

$U_{\text{доп}}$ = 0,05 · 24 = 1,2 (В)

$$b_U = \frac{p \cdot I_{max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0{,}0175 \cdot 0{,}6975 \cdot 0{,}12}{1{,}2 \cdot 0{,}0965} \approx 0{,}01265\ (\text{мм})$$

4.1.3 Визначення діаметра контактної площадки

Необхідні параметри для визначення контактного майданчика наведені на рис. 4.1.

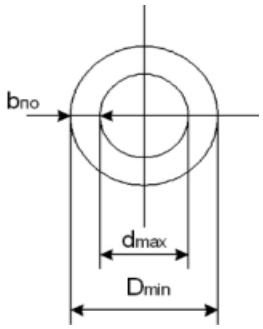

Рисунок 4.1 – Параметри контактного майданчика

Розрахунок D_{min} відбувається за наступною формулою 4.5:

$$D_{min} = D_{min1} + 1{,}5h_{\text{ф}} + 0{,}03, \quad (4.5)$$

де D_{min1} – мінімальний ефективний діаметр КМ, мм;

$h_{\text{ф}}$ – товщина фольги, $h_{\text{ф}}$ = 0,035 мм. Коефіцієнт 1,5$h_{\text{ф}}$ враховує підтравлювання фольги друкованого провідника в ширину;

0,03 – КМ виготовляють комбінованим позитивним методом.

Параметр D_{min1} розраховується за формулою (4.6):

$$D_{min1} = 2 * (b_{\text{по}} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_0 + \delta_{\text{км}}), \quad (4.6)$$

δ_0 - похибка розташування центру отвора щодо вузла КС, δ_0=0,07 мм,

$\delta_{\text{км}}$ - похибка розташування центру КМ щодо вузла КС, $\delta_{\text{км}}$=0,05.

Для розрахунку необхідно визначити d_{max}, який визначається за формулою 4.7:

$$d_{max} = d + \Delta d + (0{,}1 \ldots 0{,}15), \quad (4.7)$$

Таким чином:

$$d_{max} = 0{,}9 + 0{,}05 + 0{,}15 = 1{,}1 \text{ (мм)}$$

$$D_{min1} = 2 * \left(0{,}05 + \frac{1{,}1}{2} + 0{,}07 + 0{,}05\right) = 1.4 \text{ (мм)}$$

$$D_{min} = 1{,}44 + 1{,}5 * 0{,}035 + 0{,}03 = 1{,}5 \text{ (мм)}$$

Далі визначимо максимальний діаметр КМ за формулою 4.8:

$$D_{max} = D_{min} + 0{,}02, \quad (4.8)$$

$$D_{max} = 1{,}5 + 0{,}02 = 1{,}52 \text{ (мм)}$$

4.1.4 Визначення мінімальної ширини провідника

Мінімальна ширина провідника визначається за формулою 4.9:

$$b_{min} = b_{\text{пр}}^{\text{г}} + 1{,}5 * h_{\text{ф}} + 0{,}03 \quad (4.9)$$

де $b_{\text{пр}}^{\text{г}}$– мінімальна ширина провідника, визначається з таблиці класів точності. Для 4-го класу точності $b_{\text{пр}}^{\text{г}}$= 0,15 мм

$$b_{min} = 0{,}15 + 1{,}5 * 0{,}035 + 0{,}03 = 0{,}23 \text{ (мм)}$$

Розрахуємо максимальну ширину провідника за формулою (4.10):

$$b_{max} = b_{min} + 0{,}02, \quad (4.10)$$

$$b_{max} = 0{,}23 + 0{,}02 = 0{,}25 \text{ (мм)}$$

4.1.5 Визначення мінімальної відстані між двома сусідніми провідниками

Параметри відстані між двома сусідніми провідниками наведено на рис. 4.2.

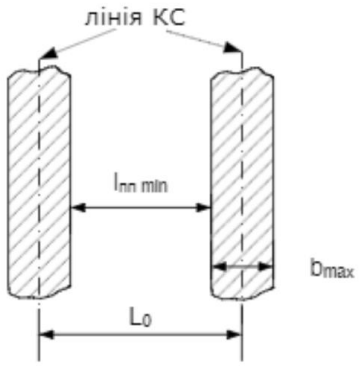

Рис. 4.2 – мінімальна відстань між двома сусідніми провідниками

Використовуючи формулу 4.11 розрахуємо мінімальну відстань:

$$l_{\text{ПП}\,min} = L_0 - (b_{max} + 2 * \delta_{\text{сп}}), \quad (4.11)$$

$$l_{\text{ПП } min} = 1{,}25 - (0{,}25 + 2 * 0{,}05) = 0{,}9 \text{ (мм)}$$

4.1.6 Визначення мінімальної відстані між двох контактних площин

Параметри мінімальної відстані між двох контактних площин наведено на рис. 4.3.

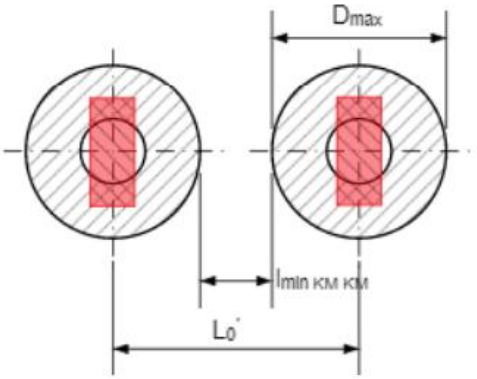

Рис. 4.3 – мінімальна відстань між двох контактних площин.

Для розрахунку відстані між двома контактними площинами використаємо формулу 4.12:

$$l_{\text{min КМ КМ}} = L_{01} - (D_{max} + 2 * \delta_{\text{КМ}}), \quad (4.12)$$

де L_{01}- відстань між центрами сусідніх контактних площин, L_{01} = 2,5 мм.

$$l_{\text{min КМ КМ}} = L_{01} - (D_{max} + 2 * \delta_{\text{КМ}}) = 2{,}5 - (1{,}6025 + 2 * 0{,}05) = 0{,}8 \text{ (мм)}$$

Розраховане значення задовольняє четвертий клас точності.

4.2 Електричний розрахунок друкованої плати

4.2.1 Визначення падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику

Визначимо падіння напруги на друкованому провіднику за формулою 4.13:

$$U_{\text{пад}} = \frac{p \cdot I_{max} \cdot L_{\text{пров}}}{b_{min} \cdot t_{\text{пр}}}, \quad (4.13)$$

де ρ – питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, $\rho = 0{,}0175 \ \frac{\text{Ом} * \text{мм}^2}{\text{м}}$;

I_{max} – сума струмів усіх активних елементів, $I_{max} = 697{,}5$ мА (розрахунок наведено у попередньому розділі, пункт 4.1.1);

$L_{\text{пров}}$ – максимальна довжина друкованого провідника, $L_{\text{пров}} = 120$ мм

b_{min} – мінімальна ширина друкованого провідника, b_{min} = 0,23 мм (розрахунок наведено у попередньому розділі, пункт 4.1.4);

$t_{\text{пр}}$ – товщина провідника, $t_{\text{пр}}$ = 0,0965 мм (розрахунок наведено у попередньому розділі, пункт 4.1.1).

$$U_{\text{пад}} = \frac{0{,}0175 \cdot 0{,}6975 \cdot 0{,}12}{0{,}23 \cdot 0{,}0965} \approx 0{,}066(\text{В})$$

Розраховане значення падіння напруги не перевищує 5% від напруги живлення (24 В).

4.2.2 Визначення потужності втрат двошарової друкованої плати

Визначимо потужність втрат за формулою 4.14:

$$P_{\text{пот}} = 2\pi f C E_n^2 tan\sigma, \quad (4.14)$$

де f = 8МГц (розрахунок ведеться на постійному струмі);

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

С - ємність друкованої плати, яка визначається за наступною формулою (4.15):

$$C = \frac{0{,}009 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h}, \quad (4.15)$$

де ε - діелектрична проникність, для FR4 ε = 4,3;

S_m - площа металізації, мм2;

h - товщина друкованої плати, мм.

Підставимо значення у формулу та розрахуємо:

$C = \frac{0{,}009 \cdot 4{,}3 \cdot 6930}{1{,}5} \approx 178{,}794$ (нФ)

Таким чином, потужність втрат:

$P_{\text{пот}} = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 8 \cdot 178{,}794 \cdot 25 \cdot 0{,}002 \approx 449{,}131$ (мкВт)

4.2.3 Визначення ємності між двома сусідніми провідниками, які розташовуються на одній стороні ДП та мають однакову ширину

Розрахуємо ємність між двома сусідніми провідниками за формулою 4.16:

$$\text{C} = 0{,}12\varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot [lg \frac{2S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}}]^{-1} \quad , \quad (4.16)$$

де ε - діелектрична проникність, ε = 4,3 для FR4;

S – відстань між двома паралельними провідниками, мм;

$b_{\text{пр}}$ - ширина друкованого провідника, 0,15 мм;

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

$l_{\text{пр}}$ - довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників, 4,2 см.

$$\text{C} = 0{,}12 \cdot 4{,}3 \cdot 4{,}2 \cdot [lg \frac{2 \cdot 0{,}3}{0{,}15 + 0{,}0965}]^{-1} \approx 5{,}6 \text{ (пФ)}$$

4.2.4 Визначення взаємної індуктивності двох паралельних провідників однакової довжини

Використаємо формулу 4.17 для визначення:

$$M = 0{,}02 \left(l_{\text{пр}} lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + L_0 \right), \quad (4.17)$$

де $l_{\text{пр}}$ - довжина перекриття паралельних провідників, 4,2 см;

L_0 - відстань між осьовими лініями двох паралельних провідників, 0,1 см.

$$M = 0{,}02 \cdot \left(4 \lg \frac{\sqrt{4^2 + 0{,}1^2} + 4{,}2}{0{,}1} - \sqrt{4^2 + 0{,}1^2} + 0{,}1 \right) = 0{,}06 \text{ (нГн)}$$

4.3. Розрахунки основних показників надійності

Друкована плата відіграє ключову роль у надійності електронного пристрою. Виробничі дефекти, механічні пошкодження провідників або дефектні паяльні з'єднання можуть спричинити миттєві відмови системи.

Якість пайки компонентів має критичне значення для експлуатаційної надійності. Недосконала пайка може викликати утворення тріщин, порушення контактів через вібрації та інші неполадки, що призводять до поступової деградації та скорочення терміну експлуатації.

Згідно з ДСТУ 2860-94, надійність визначається як властивість зберігати функціональні параметри в межах встановлених допусків упродовж заданого періоду часу.

Найбільш об'єктивним критерієм є середній час безвідмовної роботи до

першої відмови. Для оцінки надійності застосовують функцію щільності розподілу часу безвідмовної роботи f(t) та функцію інтенсивності відмов λ(t).

При розрахунку інтенсивності відмов компонентів використовують базове значення інтенсивності відмов за стандартних умов експлуатації. Цей параметр визначається експериментально та документується у спеціалізованих довідникових матеріалах для різних типів електронних компонентів. Використано дані із джерела.

4.3.1 Коефіцієнт навантаження резисторів:

Для резисторів коефіцієнт навантаження визначається на основі потужності, що розсіюється на елементі. У якості розрахункового випадку обираємо резистор з мінімальним номінальним опором у схемі а саме, 750 Ом (резистор який має опір 330 Ом стоїть поруч з резистором на 10к Ом, тому він не підходить), оскільки він працює в найбільш напружених умовах. Для резисторів з більшими значеннями опору коефіцієнт навантаження буде нижчим. Розрахунок здійснюється згідно з формулою 4.18:

$$K_{\text{н}R} = \frac{U^2}{R \cdot P_{\text{ном}}}, \tag{4.18}$$

де R = 750 Ом, $P_{\text{ном}}$ = 0,25 Вт – номінальна потужність;
U = 3,3 В − напруга живлення (максимально можлива на елементі).
Тоді,

$$K_{\text{н}R} = \frac{3{,}3^2}{750 \cdot 0{,}25} \approx 0{,}00363$$

4.3.2 Коефіцієнт навантаження для конденсаторів:

Для конденсаторів коефіцієнт навантаження визначається по напрузі. Розраховуємо коефіцієнт для керамічних конденсаторів за формулою 4.19:

$$K_{\text{н}C} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} \tag{4.19}$$

Тоді,

$$K_{\text{н}C} = \frac{12}{24} = 0{,}5$$

4.3.3 Коефіцієнт навантаження для діодів:

Коефіцієнт навантаження діодів є одним з ключових показників надійності

електронних пристроїв, що характеризує ступінь використання параметрів напівпровідникового елемента відносно його граничних можливостей. Правильний вибір робочого режиму діода забезпечує не тільки стабільну роботу всього пристрою, але й значно впливає на його довговічність та ймовірність безвідмовної роботи.

Визначимо коефіцієнт навантаження по прямому струму за формулою 4.20:

$$K_{\text{н}VD} = \frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{ном}}} \tag{4.20}$$

Знайдемо робочий струм:

$\text{I}_{\text{роб}} = \frac{(12-2)}{2200} = 4{,}5$ мА

Далі розрахуємо коефіцієнт навантаження:

$K_{\text{н}VD} = \frac{4{,}5}{20} = 0{,}225$

4.3.4 Коефіцієнт навантаження для операційних підсилювачів:

Визначення коефіцієнта навантаження для операційних підсилювачів має особливе значення, оскільки ці компоненти працюють в активному режимі з постійним споживанням струму та можуть піддаватися значним навантаженням по всіх основних параметрах: напрузі живлення, вихідному струму та потужності розсіювання. Правильний розрахунок коефіцієнтів навантаження дозволяє забезпечити стабільну роботу підсилювальних каскадів та запобігти тепловому перевантаженню мікросхем.

Визначимо коефіцієнт навантаження для ОП за допомогою формули 4.21:

$$K_{\text{нОП}} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} \tag{4.21}$$

Тоді маємо,

$$K_{\text{нОП}} = \frac{12}{18} = 0{,}67$$

4.3.5 Середній час напрацювання до першої відмови:

Вихідні дані для обчислення середнього часу безвідмовної роботи систематизовано в таблиці 4.2. Кліматичне виконання пристрою відповідає

категорії УХЛ 3.0, що встановлює експлуатаційний температурний діапазон від -60°C до +40°C. На основі цих температурних умов здійснюється вибір температурного коефіцієнта αt з довідкових матеріалів.

Розроблений друкований вузол класифікується як наземна електронна радіоапаратура, для якої коефіцієнт умов експлуатації становить $a_e = 10$. Значення інтенсивності відмов, представлені в таблиці, забезпечують можливість проведення розрахунків за методикою «найгіршого випадку».

Таблиця 4.2 - Показники для найгіршого випадку розрахунку надійності

Компонент	N	$\lambda_{об} \cdot 10^{-6}$, год$^{-1}$	Кн	αt	αe	$N \cdot \lambda_{об} \cdot 10^{-6} \cdot Кн \cdot \alpha t \cdot \alpha e$
Резистори	30	0,044	0,5	0,2	10	2,64
Конденсатори керамічні	3	0,022	0,6	0,4	10	0,1584
Конденсатори електролітичні	2	0,173	0,6	0,2	10	0,4152
Операційні підсилювачі	2	0,03	0,7	1,2	10	0,504
Діоди	6	0,015	0,5	0,8	10	0,36
Дисплей	1	0,08	0,8	1	10	0,64
Роз'єми	2	0,015	1	1	10	0,3
Кнопки	10	0,03	1	1	10	3
Пайки виводу	210	0,000069	1	1	10	0,145
Шари ДП	2	0,012	0,9	0,6	10	0,1296
Сума						8,2956

Інтенсивність відмов дорівнює сумі інтенсивності відмов компонентів, наведено формулу (4.21):

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_{pi} \tag{4.21}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_{pi} = 8{,}2956 * 10^{-6} \ (\text{год}^{-1})$$

Середній час напрацювання до першої відмови, визначається виразом 4.22:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{р}}} \tag{4.22}$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda_{\text{р}}} = \frac{1}{8{,}2956 \cdot 10^{-6}} \approx 111656{,}9897(\text{год})$$

4.3.6 Ймовірність безвідмовної роботи протягом року:

Ймовірність безвідмовної роботи протягом року, визначається виразом 4.23:

$$P_{\text{річн}}(t) = e^{-\lambda_p t}, \quad (4.23)$$

де t – кількість годин у році

t = 8760 (год)

Отже,

$$P_{\text{річ}}(t) = e^{-8{,}166 \cdot 10^{-6} \cdot 8760} = 0{,}931$$

4.3.7 Ймовірність відмов протягом року:

Розрахуємо ймовірність за формулою 4.24:

$$Q_{\text{річн}} = 1 - P_{\text{річн}} \quad (4.24)$$

$$Q_{\text{річн}} = 1 - 0{,}931 = 0{,}069$$

4.4 Розрахунок вібростійкості друкованого вузла

Для визначення вібростійкості друкованого вузла необхідно врахувати такі параметри матеріалу FR-4:

- модуль Юнга $E = 3{,}02 \cdot 10^{10}$ Па,
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0{,}22$,
- показник згасання $\varepsilon = 0{,}06$,
- питома щільність $\upsilon = 2{,}05 \cdot 10^4$ Н/м^3,
- питома густина $\rho = 2050$ кг/м^3,
- a, b – геометричні розміри плати ($a = 150$ мм, $b = 100$ мм),
- $\delta_{\text{ДП}}$ – товщина ДП ($\delta_{\text{ст}} = 1{,}5$ мм).

Також, визначимо масу ДП за допомогою формули 4.25:

$$m_{\text{ДП}} = ab\delta_{\text{ДП}}\rho \quad (4.25)$$

Таким чином,

$$m_{\text{ДП}} = 150 \text{ мм} \cdot 100 \text{ мм} \cdot 1{,}5 \text{ мм} \cdot 2050 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \approx 46{,}13 \text{ (г)}$$

Таблиця 4.3 – Маса елементів

Компонент	Тип	Кількість	Маса одиниці, г	Загальна маса, г
Резистори	R-0805	30	0,04	1,2
Конденсатори керамічні	C-0805	3	0,02	0,06
Конденсатори електролітичні	Electrolytic	2	0,3	0,6
Операційні підсилювачі	TL072/LM358	2	0,5	1
Діоди	Стандартні/LED	6	0,1	0,6
Транзистори	TO-92/SOT-23	4	0,15	0,6
Кнопки	Тактові	10	0,2	2
Роз'єми	Pin header	2	1,5	3
Роз'єми модулів	XS1, XS2	2	2	4
Дисплей	SPI TFT LCD	1	12	12
Сума				25,06

Наступним кроком знаходимо масу всіх елементів, які використовуються в схемі. Маси елементів наведено до таблиці 4.3.

За формулою 4.26 визначаємо коефіцієнт $К_м$, що визначає співвідношення маси ЕРЕ до маси плати:

$$K_{\text{м}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{\text{ЕРЕ}}}{m_{\text{ДП}}}}} \tag{4.26}$$

Таким чином,

$$K_{\text{м}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{25{,}06\ \text{г}}{46{,}13\ \text{г}}}} \approx 0{,}805$$

Використовуючи формулу 4.27, розрахуємо коефіцієнт α для кріплення визначається:

$$\alpha = \pi^2\left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right) \tag{4.27}$$

Отже,

$$\alpha = \pi^2\left(1 + \frac{150^2}{100^2}\right) \approx 32{,}0437$$

Використовуючи формулу 4.28, визначимо циліндричну жорсткість:

$$D = \frac{E \cdot \delta^3}{12(1-\mu^2)} \quad (4.28)$$

Тоді,

$$D = \frac{3 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}0015^3}{12(1-0{,}22^2)} \approx 8{,}86 \text{ (Нм)}$$

Визначимо частоту власних коливань друкованої плати за формулою 4.29:

$$f_c = \frac{K_м \cdot \alpha}{2\pi a^2} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot g}{\upsilon \cdot \delta}} \quad (4.29)$$

де $g = 9{,}8$ м/с^2 – прискорення вільного падіння.

Таким чином, 0,3796

$$f_c = \frac{0{,}805 \cdot 32{,}0437}{2\pi \cdot 0{,}15^2 \text{м}^2} \cdot \sqrt{\frac{8{,}86 \text{ Нм} \cdot 9{,}8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{2{,}05 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \cdot 0{,}0015 \text{ м}}} \approx 253 \text{ (Гц)}$$

За результатами розрахунків отримана частота власних коливань становить 253 Гц, що перевищує критичне значення 250 Гц. На підставі цього конструкція класифікується як абсолютно жорстка, і проведення подальших динамічних розрахунків не потрібне.

Висновок до розділу 4

Виконані в цьому розділі розрахунки підтверджують правильність прийнятих технічних рішень. При електричному розрахунку встановлено, що втрати напруги знаходяться в межах допустимих 5% від номінальної напруги живлення. Визначені параметри ємності та індуктивності між провідниками забезпечують стабільну роботу пристрою.

Розрахунок надійності показав високий рівень експлуатаційної стабільності пристрою. Всі значення, а саме $K_{нR} = 0{,}00363$, $K_{нC} = 0{,}5$, $K_{нVD} = 0{,}225$, $K_{нОП} = 0{,}67$, значно нижче критичних меж 0,8-0,9, що забезпечує роботу компонентів у режимі енергозбереження з запасом надійності.

Якість пайки та виготовлення друкованої плати мають критичне значення

для забезпечення розрахункової надійності. Низькі коефіцієнти навантаження гарантують мінімальну інтенсивність відмов та високу ймовірність безвідмовної роботи впродовж заданого терміну експлуатації.

Аналіз віброміцності показав, що при частоті власних коливань 253 Гц конструкція характеризується абсолютною жорсткістю. Це виключає необхідність застосування спеціальних віброзахисних заходів та додаткових конструктивних елементів для компенсації вібраційних впливів.

Розділ 5. АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розроблене програмне забезпечення являє собою генератор музичних композицій, що використовує можливості штучного інтелекту для створення унікальних музичних послідовностей. Система базується на інтеграції з сервісом Groq AI та реалізована мовою програмування Python з використанням стандартних бібліотек для роботи з мережевими запитами та обробки JSON-даних.

Основною концепцією програми є автоматизоване створення музичних прогресій шляхом застосування алгоритмів машинного навчання для вибору музичної тональності, настрою композиції та послідовності нот. Програма демонструє практичне застосування технологій ШІ у сфері музичного мистецтва, надаючи користувачам можливість генерувати оригінальні музичні ідеї без глибоких знань теорії музики.

Архітектура рішення побудована на принципах модульності та розширюваності, що забезпечує легкість підтримки та можливість подальшого розвитку функціоналу. Програма взаємодіє з зовнішнім API сервісом через захищені HTTPS-з'єднання, забезпечуючи надійність та безпеку передачі даних.

5.1 Код програми та опис її частин

5.1.1 Підключення бібліотек та імпорт модулів

```
import urllib.request
import json
import random
import time
from typing import List, Optional
```

Рисунок 5.1 – Підключення бібліотек та імпорт модулів

Опис:

- urllib.request - стандартна бібліотека Python для виконання HTTP-запитів до веб-сервісів
- json - модуль для роботи з JSON-форматом даних (парсинг та серіалізація)

- random - генератор випадкових чисел, використовується як резервний механізм
- time - модуль для роботи з часом (імпортований, але не використовується в коді)
- typing.List, Optional - типи для анотації змінних (List для списків, Optional для необов'язкових значень)

5.1.2 Оголошення класу та ініціалізація

```
class GroqAIMusicGenerator:
    def __init__(self):
        self.note_names = ['C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'A', 'B']

        self.groq_config = {
            'url': 'https://api.groq.com/openai/v1/chat
                /completions',
            'token':
                'gsk_LBcRJiBycmCiPM47a8N1WGdyb3FYUQzPvpcb1ehHL5vA
                eP7K3sGS',
            'model': 'llama3-8b-8192'
        }
```

Рисунок 5.2 – Оголошення класу та ініціалізація

Опис:

- Створюється клас GroqAIMusicGenerator - основний клас програми
- self.note_names - список назв музичних нот (C, D, E, F, G, A, B)
- self.groq_config - словник з конфігурацією для підключення до API Groq:
  - url - endpoint API сервісу Groq
  - token - API ключ для автентифікації
  - model - назва моделі ШІ

API ключ для роботи даної програми потрібно мати свій, щоб його отримати, все що потрібно це зареєструватись на сайті зі ШІ Groq, а далі згенерувати його в налаштуваннях.

5.1.3 Основний метод запиту до ШІ

```
def query_groq(self, prompt: str) -> Optional[str]:
    try:
        import ssl
        ssl_context = ssl.create_default_context()
        ssl_context.check_hostname = False
        ssl_context.verify_mode = ssl.CERT_NONE
```

Рисунок 5.3 – Основний метод запиту до ШІ

Опис:

- Метод приймає текстовий prompt і повертає відповідь ШІ або None
- Налаштування SSL-контексту для HTTPS-з'єднань
- check_hostname = False та verify_mode = ssl.CERT_NONE - відключення перевірки SSL-сертифікатів (небезпечно для продакшену)

```
headers = {
    'Authorization': f"Bearer {self
        .groq_config['token']}",
    'Content-Type': 'application/json',
    'User-Agent': 'Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0;
        Win64; x64) AppleWebKit/537.36'
}
```

Рисунок 5.4 – Формування заголовку

Опис:

- Формування HTTP-заголовків для запиту:
- Authorization - токен автентифікації в форматі Bearer
- Content-Type - вказує, що передаються JSON-дані
- User-Agent - ідентифікатор браузера (імітація запиту від браузера)

```
data = {
    "messages": [{"role": "user", "content": prompt}]
        ,
    "model": self.groq_config['model'],
    "max_tokens": 150,
}
```

Рисунок 5.5 – Формування запиту

Опис:

- Формування тіла запиту в JSON-форматі:
- messages - масив повідомлень у форматі чат-бота
- model - використовувана модель ШІ
- max_tokens - максимальна довжина відповіді (150 токенів)

5.1.4 Виконання HTTP-запиту

```
req = urllib.request.Request(
    self.groq_config['url'],
    data=json.dumps(data).encode('utf-8'),
    headers=headers
)
```

Рисунок 5.6 – Створення HTTP-запиту

Опис:

- Створення об'єкта HTTP-запиту
- json.dumps(data).encode('utf-8') - перетворення словника в JSON-рядок та кодування в UTF-8
- Передача URL, даних та заголовків

```
try:
    with urllib.request.urlopen(req, timeout=15,
        context=ssl_context) as response:
        result = json.loads(response.read().decode())
        return
            result['choices'][0]['message']['content'
            ].strip()
except:
    with urllib.request.urlopen(req, timeout=15) as
        response:
        result = json.loads(response.read().decode())
        return
            result['choices'][0]['message']['content'
            ].strip()
```

Рисунок 5.7 – Обробка запиту

Опис:

- Дворівнева обробка запиту: спочатку з SSL-контекстом, потім без

нього

- timeout=15 - таймаут запиту 15 секунд
- Парсинг JSON-відповіді та витягування тексту відповіді ШІ
- result['choices'][0]['message']['content'] - навігація по структурі відповіді API
- .strip() - видалення зайвих пробілів

5.1.5 Обгортка для запитів з fallback-механізмом

```
def ask_ai(self, prompt: str) -> str:
    response = self.query_groq(prompt)
    if response:
        return response
    # Fallback
    return random.choice(['C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'A', 'B'])
```

Рисунок 5.8 – Запит до ШІ

Опис:

- Інтерфейс для запитів до ШІ
- Якщо запит невдалий, повертається випадкова нота як резервний варіант
- Забезпечує стабільність роботи програми навіть при проблемах з мережею

5.1.6 Вибір музичної тональності та настрою

```
def ai_select_key_and_mood(self):
    key_prompt = f"Select one musical key from: {', '.join
        (self.note_names)}. Reply with just the note name."
    ai_key = self.ask_ai(key_prompt)

    selected_key = 'C'
    for note in self.note_names:
        if note in ai_key:
            selected_key = note
            break
```

Рисунок 5.9 – Вибір тональності

Опис:

- Формування prompt для вибору музичної тональності
- ', '.join(self.note_names) - об'єднання нот в рядок через кому

- Пошук згаданої ноти в відповіді ШІ
- За замовчуванням використовується тональність C

```
selected_key = 'C'
for note in self.note_names:
    if note in ai_key:
        selected_key = note
        break

mood_prompt = "Choose one mood: happy, sad, energetic,
    calm, mysterious. Reply with just the mood word."
ai_mood = self.ask_ai(mood_prompt)

moods = ['happy', 'sad', 'energetic', 'calm',
    'mysterious']
selected_mood = 'happy'
for mood in moods:
    if mood in ai_mood.lower():
        selected_mood = mood
        break
```

Рисунок 5.10 – Вибір настрою

Опис:

- Аналогічний процес для вибору настрою композиції
- .lower() - перетворення в нижній регістр для надійного пошуку
- Повернення кортежу з тональністю та настроєм

5.1.7 Генерація нотної прогресії

```
def ai_create_note_progression(self, key: str, mood: str):
    prompt = f"""Create an 8-note progression in {key} key
        with {mood} mood.
    Use only these 7 notes: {', '.join(self.note_names)}
    Reply with exactly 8 note names separated by commas."""

    ai_response = self.ask_ai(prompt)
```

Рисунок 5.11 – Генерація нотної прогресії

Опис:

- Створення детального prompt для генерації 8-нотної прогресії
- Вказівка конкретної тональності та настрою
- Обмеження використання лише 7 основними нотами

```
note_progression = []
for note in self.note_names:
    if note in ai_response:
        note_progression.append(note)

while len(note_progression) < 8:
    note_progression.append(random.choice(self.note_names
        ))

return note_progression[:8]
```

Рисунок 5.12 – Витягування нот з відповіді ШІ

Опис:

- Витягування нот з відповіді ШІ
- Доповнення прогресії випадковими нотами до 8 елементів
- [:8] - обрізання до точно 8 нот

5.1.8 Основний метод композиції

```
def run_ai_composition(self):
    print("GROQ AI MUSIC GENERATOR")
    print("=" * 40)

    # Generate composition
    key, mood = self.ai_select_key_and_mood()
    note_progression = self.ai_create_note_progression(key,
        mood)
```

Рисунок 5.13 – Витягування нот з відповіді ШІ

Опис:

- Виведення заголовка програми
- "=" * 40 - створення рядка з 40 знаків "="
- Послідовний виклик методів генерації

```
print(f"Key: {key} | Mood: {mood}")
print()
print("NOTE PROGRESSION:")
print("-" * 25)
print(" -> ".join(note_progression))

return {
    'key': key,
    'mood': mood,
    'note_progression': note_progression
```

Рисунок 5.13 – Форматований вивід результатів

Опис:

- Форматований вивід результатів
- " -> ".join(note_progression) - з'єднання нот стрілками
- Повернення словника з результатами композиції

```
if __name__ == "__main__":
    generator = GroqAIMusicGenerator()

    try:
        composition = generator.run_ai_composition()
        print("\nCOMPLETE!")

    except Exception as e:
        print(f"Error: {e}")
```

Рисунок 5.14 – Форматований вивід результатів

Опис:

- Перевірка прямого запуску файлу
- Створення екземпляра генератора
- Обробка винятків з виведенням помилок

5.2 Алгоритм роботи

Алгоритм роботи програми генерації музичних композицій базується на послідовному взаємодії з сервісом штучного інтелекту Groq для створення унікальних музичних творів. Процес починається з ініціалізації системи, під час якої програма завантажує необхідні бібліотеки та встановлює базові параметри роботи. На цьому етапі формується масив із семи основних музичних нот (C, D, E, F, G, A, B) та налаштовується конфігурація для підключення до API сервісу, включаючи URL ендпоінту, токен автентифікації та параметри використовуваної моделі штучного інтелекту Llama 3.

Основний робочий цикл програми розпочинається з етапу генерації музичних параметрів, де система послідовно визначає ключові характеристики майбутньої композиції. Спочатку програма формує спеціалізований текстовий запит до ШІ з проханням обрати одну з семи доступних музичних тональностей. Отримавши відповідь від нейронної мережі, алгоритм аналізує текст відповіді та

витягує з неї назву ноти, яка буде використана як основна тональність композиції. У випадку, якщо відповідь ШІ не містить розпізнаваної ноти або запит завершився невдачею, система автоматично встановлює тональність С як базову. Аналогічним чином відбувається вибір емоційного забарвлення композиції, де ШІ обирає один з п'яти запропонованих настроїв: щасливий, сумний, енергійний, спокійний або загадковий.

Найбільш складним та творчим етапом алгоритму є створення музичної прогресії, де штучний інтелект генерує послідовність з восьми нот, враховуючи попередньо обрану тональність та настрій. Програма формує детальний запит до ШІ, специфікуючи всі необхідні параметри: кількість нот у прогресії, музичну тональність, емоційний настрій та обмеження щодо використання лише семи основних нот. Після отримання відповіді від нейронної мережі, алгоритм проводить аналіз тексту, витягаючи з нього назви нот та формуючи з них упорядковану послідовність. Якщо ШІ генерує менше восьми нот або частина нот не розпізнається, система автоматично доповнює прогресію випадковими нотами з базового масиву до досягнення необхідної довжини.

Завершальний етап алгоритму включає обробку та презентацію результатів генерації. Програма компонує всю отриману інформацію у структурований вигляд, відображаючи обрану тональність, настрій композиції та повну нотну прогресію у зручному для сприйняття форматі. Результати виводяться на екран у вигляді послідовності нот, з'єднаних стрілками, що наочно демонструє музичний розвиток композиції. Одночасно програма формує структурований словник з усіма параметрами композиції, який може бути використаний для подальшої обробки або збереження результатів. Протягом всього процесу роботи алгоритм забезпечує стійкість до помилок завдяки реалізованим механізмам резервного вибору та обробки винятків, що гарантує отримання результату навіть у разі тимчасових проблем з мережевим з'єднанням або сервісом ШІ.

Висновок до розділу 5

У даному розділі проведено комплексний аналіз розробленого програмного забезпечення для генерації музичних композицій з використанням технологій штучного інтелекту. Детальний розгляд архітектури системи продемонстрував ефективність обраного підходу до інтеграції зовнішніх AI-сервісів у процес музичної творчості.

При розробці програмного коду було враховано ключові особливості реалізації, зокрема використання стандартних бібліотек Python для мережевої взаємодії, впровадження надійної системи обробки помилок та створення гнучкого механізму резервного вибору параметрів. Особливу увагу було приділено методам взаємодії з API сервісу Groq, що включають правильне формування HTTP-запитів, налаштування SSL-з'єднань та обробку JSON-відповідей.

Аналіз алгоритму роботи системи підтвердив його логічну послідовність та ефективність. Поетапний підхід до генерації музичних параметрів - від вибору тональності та настрою до створення повноцінної нотної прогресії - забезпечує створення музично обґрунтованих послідовностей. Важливим досягненням є реалізація механізмів стійкості системи, які гарантують отримання результату навіть у разі тимчасових збоїв у роботі зовнішніх сервісів.

Розроблене програмне рішення демонструє успішне поєднання класичних підходів програмування з сучасними технологіями машинного навчання. Модульна архітектура системи створює передумови для подальшого розширення функціоналу та адаптації до різних сценаріїв використання.

ВИСНОВКИ

В рамках дипломного проєкту проведено комплексне дослідження теоретичних основ звукового синтезу та розроблено інноваційне програмно-апаратне рішення для генерації музичних композицій з використанням технологій штучного інтелекту.

Теоретичний аналіз принципів субтрактивного синтезу підтвердив його актуальність завдяки гнучкості, простоті реалізації та великому творчому потенціалу. Порівняльний аналіз існуючих рішень виявив основні недоліки: високу затримку в проєктах на основі Google Magenta, обмеження парафонічного режиму в Arturia MicroFreak та втрату переваг аналогової обробки в Critter & Guitari Organelle M.

Розроблена структурна схема синтезатора базується на мікроконтролері Raspberry Pi Zero WH, компактному TFT IPS дисплеї та операційному підсилювачі TL072QDREP. Система керування включає десять кнопок типу Tact Switch та стабільне живлення від імпульсного джерела Mean Well HDR-60-24.

У межах реалізації проєкту прийнято технологічне рішення щодо використання матеріалу FR-4 як основи для виготовлення друкованих плат четвертого класу точності, виробництво яких здійснюється із застосуванням комбінованого позитивного методу формування провідних шарів. Розрахунок надійності показав високий рівень експлуатаційної стабільності пристрою. Всі значення, а саме $K_{нR} = 0{,}00363$, $K_{нC} = 0{,}5$, $K_{нVD} = 0{,}225$, $K_{нОП} = 0{,}67$, значно нижче критичних меж 0,8-0,9, що забезпечує роботу компонентів у режимі енергозбереження з запасом надійності. Частота власних коливань 253 Гц забезпечує абсолютну жорсткість конструкції.

Розроблене програмне забезпечення демонструє ефективну інтеграцію сервісів штучного інтелекту в процес музичної творчості шляхом реалізації модульної архітектури з гнучким механізмом резервного налаштування параметрів.

Запропоноване рішення успішно поєднує класичні підходи програмування з сучасними технологіями машинного навчання, підтверджуючи перспективність використання штучного інтелекту для автоматизації музичної творчості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ І ПОСИЛАННЯ

1. Making a Neural Synthesizer Instrument. Веб-ресурс: https://magenta.tensorflow.org/nsynth-instrument

2. Як працює синтезатор? Веб-ресурс: https://emastered.com/uk/blog/how-does-a-synthesizer-work

3. Nsynth super Google Magenta + Raspberry Pi. Веб-ресурс: https://nsynthsuper.withgoogle.com

4. MicroFreak Experimental Hybrid Synth. Веб-ресурс: https://www.arturia.com/products/hardware-synths/microfreak/overview

5. Critter & Guitari Organelle M. Веб-ресурс: https://www.critterandguitari.com/organelle

6. Raspberry Pi Datasheets. Веб-ресурс: https://datasheets.raspberrypi.com

7. MusicVAE: Creating a palette for musical scores with machine learning. https://magenta.tensorflow.org/music-vae

8. TL072 Datasheet. Веб-ресурс: https://surli.cc/xyoizm

9. TFT SPI LCD 1,8”. Веб-ресурс: https://www.hotmcu.com/18-128x160-tft-lcd-with-spi-interface-p-314.html

10. FR-4 Datasheet. Веб-ресурс: https://www.farnell.com/datasheets/1644697.pdf

11. Методи виготовлення друкованих плат. Веб-ресурс: https://studfile.net/preview/9719834/page:10/

12. Губар В. Г., Адаменко І. О. Фізико-теоретичні основи проєктування радіоелектронної апаратури. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

ДОДАТОК А

Технічне завдання на проектування

1. Найменування та галузь використання

Пристрій генерації звукових сигналів із застосуванням штучного інтелекту. Пристрій застосовується в музичній індустрії для створення нових композицій, допомоги композиторам у генерації творчих ідей та розробки саундтреків для мультимедійних проектів. В освітній сфері система може використовуватися для навчання основ музичної теорії, проведення досліджень у галузі цифрової обробки сигналів та експериментів з алгоритмами машинного навчання.

2. Підстава для розробки

Підставою для розробки є завдання на дипломний проект згідно наказу по НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» від «03» червня 2025 р. №1885-с

3. Мета і призначення розробки

Розробка пристрою генерації звукових сигналів із застосуванням штучного інтелекту.

4. Технічні вимоги

4.1. Склад виробу й вимоги до пристрою, що розробляється

Пристрій складається з блоку вводу, блоку керування та блоку вводу. Являє собою друкований вузол з двома роз’ємами, мікроконтролером кнопками для керування та дисплей.

4.2. Напруга живлення

Комплекс повинен мати два джерела живлення 24 В та 5 В.

4.3. Маса

Маса виробу повинна бути до 500 г

4.4. Показники призначення

Пристрій повинен відтворювати звук та виводити на динамік та відображення даних для користувача на дисплеї.

4.5. Вимоги до надійності

Середній час напрацювання на відмову не менше 70000 годин.

4.6. Вимоги до технологічності

Орієнтовані на лабораторні або домашні прийоми виготовлення деталей і складання.

4.7. Вимоги до рівня уніфікації й стандартизації

Для виготовлення системи передбачається застосування стандартних, уніфікованих деталей та виробів.

4.8. Вимоги безпеки обслуговування

Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури низької напруги ГОСТ 12.2.007-83.

4.9. Вимоги до складових частин виробу, сировини, вихідних і експлуатаційних матеріалів

Для виробництва використовувати матеріали імпортного виробництва, або їх аналоги вітчизняного виробництва.

4.10. Умови експлуатації

Кліматичне виконання УХЛ 3.1.

4.11. Вимоги до транспортування і зберігання

Умови зберігання за групою Л1. Зберігати в опалювальних та вентильованих складах, сховищах з кондиціонуванням повітря, розташованих в будь-яких макрокліматичних районах, в яких забезпечуються наступні умови:

- Температура повітря +5…+40С,
- Відносна вологість повітря 60% при 20^{o}С (середньорічне значення),
- Атмосферний тиск 84…106кПа,
- Транспортувати автомобільним, залізничним або авіаційним видами транспорту в спеціальній транспортній тарі.

5. Результати роботи

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

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

6. Проєкт повинен містити в собі такі документи як:

- Пояснювальна записка (формату А4, до 90 аркушів);
- схему електричну принципову та перелік елементів (формату А1, А4 відповідно) ;
- Схема електрична структурна пристрою (формату А1);
- складальне креслення плати та специфікацію (формату А2, А4 відповідно);
- креслення друкованої плати (формату А1);
- додатки (формату А4).

7. 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.

У процесі виконання роботи проміжні звіти надаються комісії не рідше 1 раз у тиждень на загальних умовах.

8. Економічні показники

В умовах даного проекту не розглядаються.

ДОДАТОК Б

Код програми

```
import urllib.request
import json
import random
import time
from typing import List, Optional

class GroqAIMusicGenerator:
    def __init__(self):
        self.note_names = ['C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'A', 'B']

        self.groq_config = {
            'url': 'https://api.groq.com/openai/v1/chat/completions',
            'token':
'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',
            'model': 'llama3-8b-8192'
        }

    def query_groq(self, prompt: str) -> Optional[str]:
        try:
            import ssl
            ssl_context = ssl.create_default_context()
            ssl_context.check_hostname = False
            ssl_context.verify_mode = ssl.CERT_NONE

            headers = {
                'Authorization': f"Bearer {self.groq_config['token']}",
                'Content-Type': 'application/json',
```

```
                'User-Agent': 'Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64)
AppleWebKit/537.36'
            }

            data = {
                "messages": [{"role": "user", "content": prompt}],
                "model": self.groq_config['model'],
                "max_tokens": 150,
                "temperature": 0.7
            }

            req = urllib.request.Request(
                self.groq_config['url'],
                data=json.dumps(data).encode('utf-8'),
                headers=headers
            )

            try:
                with urllib.request.urlopen(req, timeout=15, context=ssl_context) as
response:
                    result = json.loads(response.read().decode())
                    return result['choices'][0]['message']['content'].strip()
            except:
                with urllib.request.urlopen(req, timeout=15) as response:
                    result = json.loads(response.read().decode())
                    return result['choices'][0]['message']['content'].strip()

        except Exception:
            return None
```

```
        def ask_ai(self, prompt: str) -> str:
            response = self.query_groq(prompt)
            if response:
                return response
            # Fallback
            return random.choice(['C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'A', 'B'])

        def ai_select_key_and_mood(self):
            key_prompt = f"Select one musical key from: {', '.join(self.note_names)}. Reply with just the note name."
            ai_key = self.ask_ai(key_prompt)

            selected_key = 'C'
            for note in self.note_names:
                if note in ai_key:
                    selected_key = note
                    break

            mood_prompt = "Choose one mood: happy, sad, energetic, calm, mysterious. Reply with just the mood word."
            ai_mood = self.ask_ai(mood_prompt)

            moods = ['happy', 'sad', 'energetic', 'calm', 'mysterious']
            selected_mood = 'happy'
            for mood in moods:
                if mood in ai_mood.lower():
                    selected_mood = mood
                    break
```

```
        return selected_key, selected_mood

    def ai_create_note_progression(self, key: str, mood: str):
        prompt = f"""Create an 8-note progression in {key} key with {mood}
mood.
        Use only these 7 notes: {', '.join(self.note_names)}
        Reply with exactly 8 note names separated by commas."""

        ai_response = self.ask_ai(prompt)

        note_progression = []
        for note in self.note_names:
            if note in ai_response:
                note_progression.append(note)

        while len(note_progression) < 8:
            note_progression.append(random.choice(self.note_names))

        return note_progression[:8]

    def run_ai_composition(self):
        print("GROQ AI MUSIC GENERATOR")
        print("=" * 40)

        # Generate composition
        key, mood = self.ai_select_key_and_mood()
        note_progression = self.ai_create_note_progression(key, mood)
```

```
        # Display minimal output
        print(f"Key: {key} | Mood: {mood}")
        print()
        print("NOTE PROGRESSION:")
        print("-" * 25)
        print(" -> ".join(note_progression))

        return {
            'key': key,
            'mood': mood,
            'note_progression': note_progression
        }

if __name__ == "__main__":
    generator = GroqAIMusicGenerator()

    try:
        composition = generator.run_ai_composition()
        print("\nCOMPLETE!")

    except Exception as e:
        print(f"Error: {e}")

if __name__ == "__main__":
    generator = GroqAIMusicGenerator()

    try:
        composition = generator.run_ai_composition()
        print("\nCOMPLETE!")
```

```
except Exception as e:
    print(f"Error: {e}")
```