

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Мікроконтролерний пристрій для синтезу музики

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи КІУКІ-21-3

Данило ХИЖНЯК

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник: Дмитро РОСІНСЬКИЙ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ЕОМ

(підпис)

Андрій КОВАЛЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Хижняку Данилу Євгеновичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Мікроконтролерний пристрій для синтезу музики

затверджена наказом по університету від “ 26 ” травня 2025 р. № 424 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17 червня 2025 р.

3. Вхідні дані до роботи 1) безконтактне керування; 2) поліфонія; 3) автономність

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Аналіз ринку інноваційних засобів формування музичної компетентності учнів

Висвітлення основних понять в галузі оцифрування звуку та аналогового синтезу

Розробка інноваційного засобу формування музичної компетентності учнів

Тестування та демонстрація розробки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій 12

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми та огляд наявних рішень	27.05.25-30.05.25	
2	Огляд теоретичних аспектів в галузі аудіо	31.05.25-02.06.25	
3	Вибір компонентної бази та розробка схеми	03.06.25-06.06.25	
4	Розробка алгоритму програми та її написання	07.06.25-09.06.25	
5	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	10.06.25-11.06.25	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	12.06.25-13.06.25	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	14.06.25-16.06.25	

Дата видачі завдання “ 26 ” травня 2025 р.

Здобувач

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Дмитро РОСІНСЬКИЙ

_____ (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 62 с., 10 рис., 1 табл., 2 дод., 17 джерел.

СИНТЕЗАТОР, ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС, НУЩ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ОСЦИЛЯТОР

Метою кваліфікаційної роботи є створення мікроконтролерного пристрою для синтезу звуку у реальному часі, основне призначення якого полягає у використанні в рамках освітнього процесу Нової української школи з метою формування музичної компетентності, яка безумовно є важливою складовою гармонійно розвиненої особистості.

У ході виконання кваліфікаційної роботи був здійснений аналіз пристроїв на базі мікроконтролерів, переважно реалізованих на базі програмно-апаратної платформи Arduino. Сформульовані у теоретичній частині роботи недоліки наявних пропозицій (низька музична виразність, відсутність автономності, елементу новизни і цікавості) дозволили чітко визначити основні риси розробленого в ході роботи пристрою, а огляд базових понять аналогового синтезу звуку і його оцифровки – визначитися із засобами і втілити розробку, таким чином виконавши поставлені задачі.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 62 pages, 10 figures, 1 table, 2 appendices, 17 sources.

SYNTHESIZER, EDUCATIONAL PROCESS, NUS,
MICROCONTROLLER, OSCILLATOR.

The major goal of this thesis is to design and implement a microcontroller-based device for real-time sound synthesis. The primary purpose of this device is its integration into the educational process of the New Ukrainian School (NUS), aiming to develop musical competence as a crucial element of a contemporary well-educated individual.

In order to achieve this, an analysis of existing microcontroller-based audio devices was conducted, focusing mainly on implementations using the Arduino hardware-software platform. Identified shortcomings – such as limited musical expressiveness, lack of autonomy, and insufficient engagement – were used to outline the specific requirements for the developed device.

Additionally, a review of the fundamental principles of analog sound synthesis and digital audio processing informed the technical design choices and helped to ensure the functionality and relevance of the final implementation. As a result, the project objectives were successfully fulfilled.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ РІШЕНЬ	10
1.1 Актуальність впровадження інноваційних апаратних засобів для розвитку музичної компетентності здобувачів початкової освіти	10
1.2 Огляд наявних апаратних засобів, придатних до застосування в рамках освітнього процесу на уроках музичного мистецтва	12
1.3 Аналіз недоліків інноваційних апаратних засобів для розвитку музичної компетентності школярів.....	17
2 ТЕОРІЯ СИНТЕЗУ ЗВУКУ	22
2.1 Звук як фізичне явище	22
2.2 Основні поняття і процеси оцифрування звукових хвиль	25
2.3 Синтезатори і методи синтезу звуку	27
3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ	31
3.1 Формулювання технічного завдання	31
3.2 Технічна специфікація та схема пристрою	33
3.3 Програмна частина розробки	35
4 ОПИС РОЗРОБКИ	41
4.1 Демонстрація приладу	41
4.2 Інструкція користувача.....	42
ВИСНОВКИ.....	44
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	45
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	47
ДОДАТОК Б КЕРУЮЧИЙ КОД ПРОГРАМИ	54
Б.1 Заголовочний файл програми	54
Б.2 Основний код програми	55

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

НУШ – нова українська школа

МК – мікроконтролер

FM – частотна модуляція (англ. Frequency Modulation)

LFO – низькочастотний осцилятор (англ. Low Frequency Oscillator)

IDE – інтегроване середовище розробки (англ. Integrated Development Environment)

ВСТУП

Ідея формування гармонійно розвиненої особистості, здатної не лише до логічного мислення та раціонального аналізу, але й до творчого самовираження, естетичного сприйняття світу та емоційної рефлексії, є провідною в сучасній парадигмі освіти. Усе більшої актуальності набуває музична компетентність, яка здавна визнається в Україні одним з традиційних ключових елементів загального розвитку здобувачів освіти. Музика як форма мистецтва відіграє надзвичайно важливу роль у розвитку когнітивних, моторних і соціальних навичок дітей, а також у формуванні емоційної чутливості, здатності до концентрації, уяви та командної взаємодії.

Особливо значущим є розвиток музичних здібностей на рівні початкової та середньої освіти, коли закладаються основи особистісного світогляду, формуються смаки й інтереси, а також відбувається активне формування міждисциплінарних зв'язків. У цей період учні найбільш відкриті до нового досвіду, тому створення умов для доступного, інклюзивного і водночас сучасного музичного навчання є одним із пріоритетних завдань освітньої системи.

У контексті ХХІ століття традиційні форми музичної освіти дедалі частіше поєднуються або навіть трансформуються під впливом технологічних інновацій. Здобувачі освіти зростають у цифровому середовищі, де взаємодія з електронними пристроями є природною частиною повсякденного життя. Тому інтеграція технологічних засобів у навчальний процес не лише відповідає духу часу, а й сприяє підвищенню мотивації до навчання, розширює можливості для індивідуалізації освітньої траєкторії та урізноманітнює форми подачі навчального матеріалу.

У цьому контексті особливу увагу привертають технології, які поєднують технічну творчість із музичним самовираженням. Йдеться, зокрема, про використання мікроконтролерних пристроїв, що здатні

виконувати функції синтезу звуку або відтворення музичних елементів. Такі пристрої можуть бути використані як частина навчального середовища, спрямованого на розвиток музичної компетентності, з одночасним зануренням учнів у основи електроніки, схемотехніки, програмування та логічного мислення. Таким чином, створення мікроконтролерного пристрою для синтезу музики розглядається не лише як інженерне завдання, але й як засіб реалізації міждисциплінарного підходу в освіті, де поєднуються елементи мистецтва, науки й технологій.

Отже, актуальність теми створення доступного музичного технологічного інструменту для освітнього використання обумовлена як потребою в оновленні методик розвитку музичних здібностей, так і глобальною тенденцією до впровадження інтерактивних, інноваційних засобів навчання. У межах цієї практики розробка мікроконтролерного пристрою для синтезу музики розглядається як один із прикладів такого поєднання, що має потенціал для подальшого впровадження в освітній процес початкової та середньої школи.

1 АНАЛІЗ НАЯВНИХ РІШЕНЬ

1.1 Актуальність впровадження інноваційних апаратних засобів для розвитку музичної компетентності здобувачів початкової освіти

Музична освіта здавна вважається невід'ємною складовою гармонійного розвитку здобувачів початкової освіти, адже питання впливу музики на психічний та фізіологічний стан людини вивчається людством вже досить тривалий час. Ще за часів античності видатні мислителі та науковці відзначали здатність музики до естетичного виховання та формування внутрішнього світу людини [11]. В умовах реформування початкової та середньої освіти в рамках проєкту «Нова українська школа» (НУШ) необхідність художньо-естетичного формування здобувачів освіти закріплена нормативно через розвиток художньої компетентності, що передбачає «здатність розуміти та цінувати власну культуру і культурне розмаїття світу, формування естетичних смаків і потреб у творчій самореалізації» [16].

Втім, Р. Дудик, спираючись на слова композитора Д. Кабалевського, що були проголошені їм як вступне слово до конференції з теми музичного виховання, відзначає, що навчання дітей мистецтву, особливо суто теоретичне, є складною задачею за умови відсутності зацікавленості дітей у цьому виді мистецтва або у мистецтві взагалі [11]. Результати дослідження, проведеного групою закордонних науковців на чолі з М. Hogenes, постановило, що участь учнів у створенні музичних композицій як частина навчального процесу значно підвищує їхню залученість у музику, порівняно з традиційними методами, орієнтованими на відтворення музики. Учні, які брали участь у продуктивній музичній діяльності, виявляли вищий рівень інтересу, ініціативності та емоційного залучення, ніж ті, хто займався лише вивченням творів [8].

Окрім цього, педагог І. Малашевська у своїй дисертації на здобуття

доктора наук, спираючись на різні наукові джерела постулює, що особливо дієвим інструментом у розвитку музичних компетентностей та особистісних якостей здобувачів початкової освіти є орф-педагогіка. Сутність цього підходу полягає в залученні до музикування здобувачів початкової освіти незалежно від їхніх музичних здібностей. Особливий акцент робиться на єдності музики, руху і слова. Здобувач початкової освіти в такому розрізі сприймається як співавтор власного музичного світу, який створюється під керівництвом педагога [14].

Відповідно, для традиційних практичних занять з музики використовують переважно перкусійні інструменти, такі як бубни, маракаси, шейкери. Серед ритмічно-тональних інструментів зазвичай поширені ксилофони, металофони. Досить рідкісними у поширеній практиці, проте все ж вживаними є власне тональні інструменти, серед яких найпопулярнішими є різновиди духових інструментів (наприклад, блок-флейта), лютня та гітара. Ксилофони та металофони вигідно вирізняються тим, що поєднують у собі відповідно ритмічну та тональну складову, маючи змогу забезпечити більш рівномірний розвиток музичної компетентності. Проте, традиційні музичні інструменти, що використовуються в початковій школі, мають обмеження щодо варіативності, інтерактивності та залучення учнів до експериментів зі звуком. У сучасному освітньому процесі НУШ виникає потреба в оновленні методів навчання, що відповідають вимогам цифрової епохи.

Окрім сучасності, розробка інноваційного апаратного забезпечення для використання на уроках мистецтва також може бути корисною з точки зору міжпредметних зв'язків. Як зазначають у своїй статті науковці О. Бухнієва та Л. Банкул, «Інтегративні технології уроків музичного мистецтва сприяють формуванню цілісної картини світу в дітей, розумінню зв'язків між явищами в природі, суспільстві і світі загалом» [9, с. 112]. І тоді як інтеграція, наприклад, мовних або літературних елементів є вже досить тривіальною, з огляду на зростання потреби технологічної освіти вже у початковій школі, цікавим, корисним і перспективним напрямком для досліджень може стати

поєднання уроків мистецтва із цифровими технологіями, яка може бути зокрема реалізована шляхом застосування вищезгаданого апаратного забезпечення.

Так, зважаючи на відвічну актуальність мистецького, та зокрема музичного розвитку особистостей здобувачів початкової освіти, необхідність створення міжпредметних зв'язків між різноманітними галузями знань, які викладаються у початковій школі, та інноваційність пов'язання технологічної та мистецької галузей, можна зробити висновок про перспективність, новизну, а найголовніше – доцільність проєктування, розробки та впровадження проєктів, подібних до тих, що був розроблений в ході цієї кваліфікаційної роботи.

1.2 Огляд наявних апаратних засобів, придатних до застосування в рамках освітнього процесу на уроках музичного мистецтва

Зважаючи на наведені у п. 1.1 обґрунтування потенційної користі впровадження розробок на базі мікроконтролерів, які можуть бути використані в освітньому процесі на уроках мистецтва, зовсім не є дивним те, що проєкти такого плану створюються вже певний час. Оскільки проєкт, створений в ході передатестаційної практики базується на апаратній платформі Arduino для забезпечення максимальної простоти (адже насамперед він розрахований на здобувачів початкової та середньої освіти), у цьому розділі будуть висвітлені переваги продуктів зі схожими апаратними параметрами. Окрім простоти, істотною перевагою МК на платформі Arduino є те, що вони від самого початку проєктувалися як мікроконтролери для навчання, тож офіційна сторінка містить опис декількох досить простих у збиранні навіть для учнів початкової школи схем, проте з точки зору розуміння усіх нюансів схемотехніки та коду мають на нашу думку кращий освітній потенціал для здобувачів середньої освіти.

На офіційному ресурсі Arduino Education, який містить навчальні статті

по платформі Arduino, є розділ, присвячений самостійному створенню деяких простих музичних інструментів [1]. Зокрема, там описані інструкції для створення імітації терменвокса, дещо подібної до нашого проєкту, але яка використовує фоторезистор замість датчиків відстані. Схема є дуже простою, використовується лише мікроконтролер, фоторезистор, звичайний резистор та п'єзоелектричний динамік (рисунок 1.1).

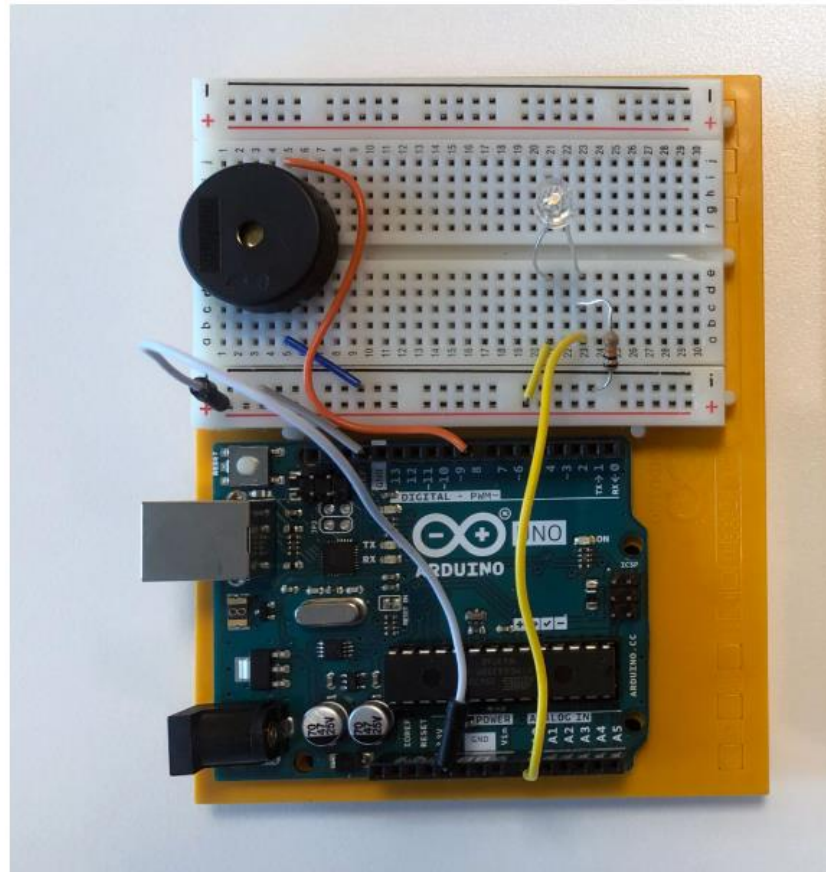


Рисунок 1.1 – Найпростіша реалізація світлового терменвоксу

Основна перевага такого проєкту в тому, що завдяки мінімуму деталей, що використовуються, він також не є перевантаженим за кодом (лістинг 1.1).

Лістинг 1.1 – Програмний код проєкту світлового терменвоксу

```
int sensorValue;
int sensorLow = 1023;
int sensorHigh = 0;
const int ledPin = 13;
void setup() {
```

```

pinMode(ledPin, OUTPUT);
digitalWrite(ledPin, HIGH);
Serial.begin(9600);
while (millis() < 5000) {
    sensorValue = analogRead(A0);
    if (sensorValue > sensorHigh) {
        sensorHigh = sensorValue;
    }
    if (sensorValue < sensorLow) {
        sensorLow = sensorValue;
    }
}
digitalWrite(ledPin, LOW);
}
void loop() {
    sensorValue = analogRead(A0);
    int pitch = map(sensorValue, sensorLow, sensorHigh, 50,
4000);
    Serial.println(pitch);
    if (pitch > 0)
    tone(8, pitch, 20);
    delay(10);
}

```

Як можна побачити, програмний принцип також є досить простим – перші 5 секунд відбувається калібрування максимальних та мінімальних значень сенсора світла шляхом їх порівняння зі змінними `sensorLow` та `sensorHigh`. Значення отримуються завдяки зчитуванню аналоговим піном (в нашому випадку `A0`) з подільника напруги, що формується резистором на `10кОм` та фоторезистором. Це робиться для визначення діапазону сенсора в умовах конкретного освітлення приміщення та забезпечення більшої чутливості. Після цього у програмному циклі відбувається прив’язка частот до інтенсивності освітлення і на п’єзоелектричний випромінювач подається відповідна частота.

Іншим представленим на цій сторінці проектом є піаніно, яке складається з п’яти тактових кнопок (4 кнопки для нот і п’ята, яка перемикає діапазон) та п’яти резисторів (рисунок 1.2).

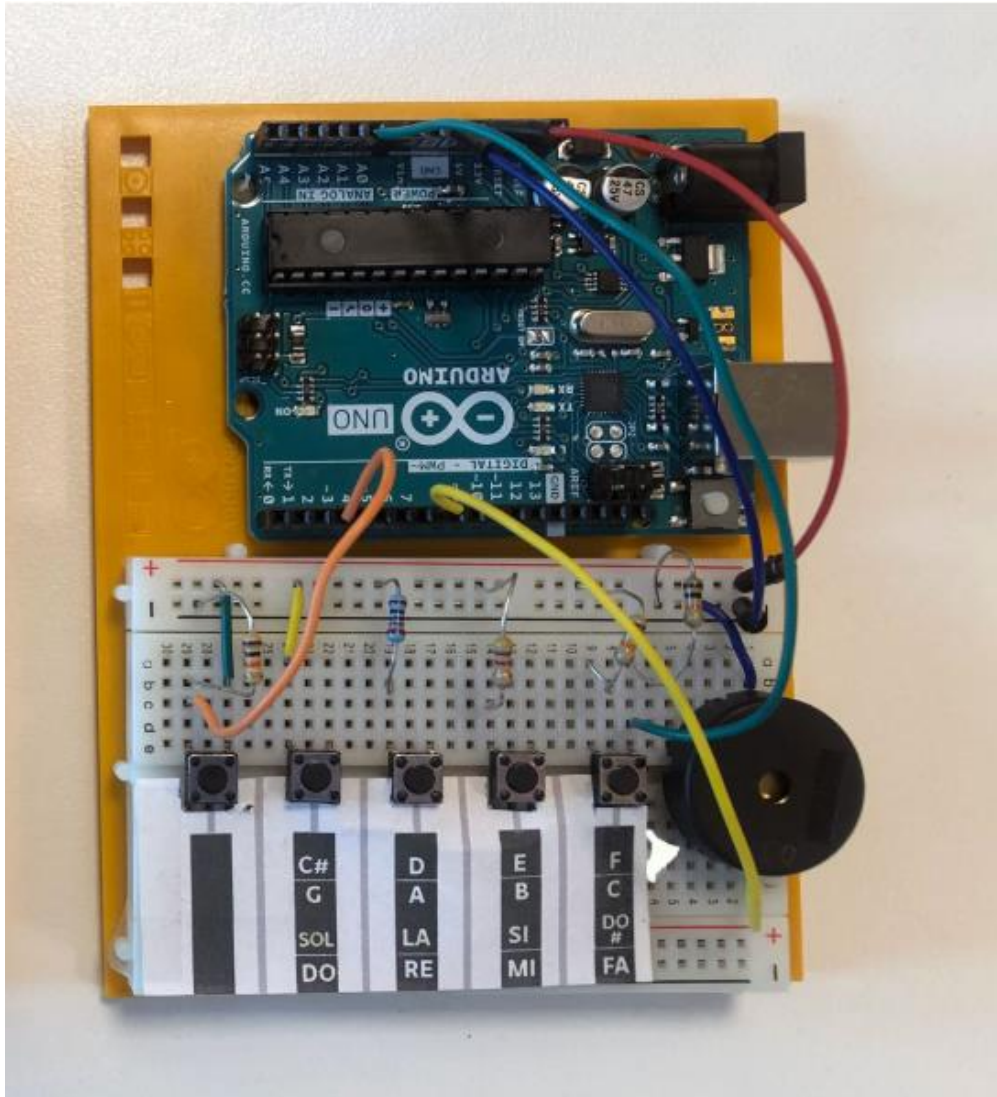


Рисунок 1.2 – Піаніно на базі подільника напруги на Arduino

Схема цього піаніно ще більш наочно демонструє учням концепцію використання подільника напруги, дозволяючи використовувати всього один аналоговий пін для розпізнавання натискання декількох кнопок, що допомагає суттєво заощадити використовувані входи і надає потенціал для розширення тонального діапазону. Аналогічну роль виконує і кнопка-перемикач, під'єднана до цифрового піну D3. Коли вона натиснута, усі інші 4 кнопки відповідають за вищі ноти, аніж коли вона відтиснута. В результаті ця схема є досить лаконічним і наочним прикладом використання фізичних принципів для реалізації якомога більшого потенціалу на обмежених апаратних ресурсах і на нашу думку непогано поєднує технологічну і музичну компетентності, що як було визначено у п. 1.1.

Ще однією групою інструментів на Arduino є перкусійні інструменти, що використовують п'єзодатчики (ідентичні до тих, що використовувалися у попередніх проєктах в ролі динаміків, але зазвичай без корпусу) для визначення власне факту та сили удару. Такі п'єзоелементи зазвичай кріпляться до саморобних так званих «педів», які імітують поверхню барабанів ударної установки, а також розширюють площу, доступну для удару, передаючи вібрації на п'єзоелемент (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Приклад педів, виготовлених з компакт-дисків та килимків для миші

Принцип роботи такої установки з точки зору коду також не є надто складним: після удару надсилається повідомлення у послідовний інтерфейс, після чого завдяки певній комбінації комп'ютерного програмного забезпечення, що залежить від операційної системи (наприклад, HairlessMIDI + loopMIDI для Windows) забезпечується можливість використання такої установки у програмах, що працюють з MIDI і дозволяють відтворювати звуки ударних установок. Щоб зробити подібний інструмент самостійним, можна

використовувати псевдовипадковий синтез шуму та коротку тривалість тону, що наблизить звук до справжньої перкусії.

З огляду на те, що інші музичні проєкти на платформі Arduino так чи інакше є схожими на розглянуті у цьому пункті, будемо вважати розгляд ключових переваг трьох видів пристроїв у цьому пункті достатнім. Визначеними у пункті перевагами першого виду проєктів – імітацій терменвоксу та схожих пристроїв для синтезу звуку, що використовують безконтактні датчики як засіб введення є: надзвичайно низька вартість, мінімум використовуваних компонентів, відчуття новизни та візуальна цікавість таких проєктів.

Найпростіші кнопкові синтезатори на Arduino можуть стати чудовою демонстрацією рішень з оптимізації схемотехніки мікроконтролерних музичних пристроїв шляхом застосування принципів фізики, що має чудовий освітній потенціал для здобувачів середньої освіти. Натомість проєкти перкусійних музичних інструментів на мікроконтролерах потребують значної кількості рукоділля і засновані на готових програмних рішеннях, що робить їх більш придатними для впровадження у початкову освіту, додатково забезпечуючи міжпредметний зв'язок музичної та технологічної галузей.

Ключовими перевагами подібних до третьої висвітленої розробки проєктів є їхній потенціал до інтеграції в уроки технологічного навчання через необхідність самостійного виготовлення педів, а також використання здебільшого готових програмних рішень і мінімальна потреба у коді. Натомість за порівняно низьку вартість отримуємо надзвичайно близький до професійних установок за якістю звуку та можливостями продукт.

1.3 Аналіз недоліків інноваційних апаратних засобів для розвитку музичної компетентності школярів

Після пошуку наявних рішень в галузі мікроконтролерних музичних інструментів, які можуть бути застосовані для розвитку музичної

компетентності здобувачів початкової та середньої освіти, було виявлено, що готових продуктів налічується досить мала кількість. Така ситуація зовсім не є дивною, адже Arduino є навчальною платформою, тож за задумом усі проєкти на його базі і мають бути у форматі «зроби сам». Тим не менш, мікроконтролери цього сімейства є чи не найдешевшими серед усіх, що є суттєвою перевагою для продукта, який повинен застосовуватися у шкільному середовищі, яке саме по собі є досить небезпечним через прояви дитячої гіперактивності, а також інциденти, що виникають через неухважність та необережність учнів. З огляду на це можна констатувати, що першою проблемою ринку, яку вирішує наш продукт, є саме відсутність готових рішень, або ще краще, рішень у вигляді конструктора, які можна було б застосовувати для розвитку музичної компетентності.

Враховуючи таку ситуацію, нами були описані радше не готові продукти, а види мікроконтролерних інструментів, адже суттєво наявні пристрої відрізняються лише за способом взаємодії з ними. За такою класифікацією з попереднього пункту можна було виділити три види музичних інструментів: тональні із безконтактним керуванням, тональні із керуванням кнопками та перкусійні інструменти засновані на п'єзодатчиках. Незважаючи на майже однаковий принцип синтезу звуку (прямокутна хвиля, яка генерується вбудованою функцією `tone()` Arduino або синтез шуму), ці проєкти відрізняються за своїми перевагами через відмінності у схемотехніці та нюансах застосування, проте здебільшого якщо розглядати їх як проєкти для самостійного збирання. Відмінності у компонентах зумовлюють різні апаратні та прикладні рішення, які можуть бути по-різному інтегровані в освітній процес. Першою проблемою безконтактного мікроконтролерного музичного інструменту на базі фоторезисторів є нестабільність та повільність у вимірюваннях, проведених подібним шляхом. Фоторезистори повільніше реагують на зміни умов порівняно, наприклад, із ультразвуковими сенсорами, а також дуже сильно залежать від освітленості приміщення. Другий озвучений недолік навіть знайшов своє відображення у коді, який був наведений у

лістингу 1.1. У ньому помітно, що перші 5 секунд роботи пристрій проводить калібрування під певні умови освітлення. Крім цього, і так не надто великий діапазон зміни опору фоторезистора, який жорстко прикріплений до певного звукового діапазону може бути зменшеним ще більше через недостатнє освітлення, яке може відрізнятись навіть у певних частинах класу. Другим істотним недоліком, який, до речі, є спільним для усіх трьох проєктів є недостатня музична виразність, що означає відсутність поліфонії, лише одну варіативну складову керування та «пласкість» тону меандру (квадратної хвилі).

Серед недоліків пристроїв, що керуються тактовими кнопками (синтезаторів), окрім вже зазначеної недостатньої музичної виразності, яка зумовлена примітивністю звучання квадратної хвилі та відсутністю поліфонії, зазвичай є в будь-якому разі сильно обмежена кількість кнопок, які можливо підключити. Втім, схема, яку ми описали у попередньому пункті, досить ефективно використовує ланцюг резисторів-подільників напруги, щоб використовувати лише один аналоговий вхід для підключення принаймні чотирьох кнопок. Такий підхід робить схему масштабованою і дозволяє в перспективі позбутися перемикача октав, який є досить незручним на практиці, хоча підходить для такого демонстраційного проєкту.

Проте це працює лише за умови, що у пристрої використовуються тактові кнопки. Якщо розглядати перспективи для вдосконалення і наближення цього прототипу до реальних музичних інструментів, не зайвим було б додати реагування на силу натискання клавіші, що буде вимагати вже аналогових сенсорів, під кожен з яких буде необхідний аналоговий пін або ускладнення конструкції через додавання чогось на кшталт мультиплексорів. Ще однією проблемою є те, що здобувачам освіти, особливо молодшого віку, може бути не надто цікаво грати на такому синтезаторі, особливо враховуючи поширеність смартфонів, які за умови відставання за тактильним фідбеком (проте все ж не надто суттєвим у порівнянні зі звичайними тактовими кнопками), надають значно більш цікаве та різноманітніше звучання. Одним

словом, суттєвим на нашу думку недоліком є тривіальність такого мікроконтролерного інструменту.

Якщо говорити про недоліки та перспективні напрямки вдосконалення інструментів, що використовують п'єзоелементи для отримання вводу від користувача, то там основна складність полягає у комплексності звуку ударних інструментів, який окрім тональної складової містить ще досить багато різних обертонів та шумів. Синтезувати такий звук лише вбудованими засобами Arduino досить складно. Натомість використання попередньо записаних семплів буде вимагати рішення проблеми їхнього зберігання на енергонезалежному носії, який збільшує собівартість приладу. Серед інших обмежень таких пристроїв можна назвати складну реалізацію поліфонії. Наведені проблеми вирішуються зміною концепції приладу на MIDI-інструмент, таким чином перекладаючи синтез звуку та обробку подій на більш потужний обчислювальний пристрій у вигляді ПК, проте це виключає одну з ключових переваг мікроконтролерних виробів – автономність.

Розроблений в ході роботи продукт за ідеями дуже схожий на перший з описаних проєктів, проте ключовою відмінністю є те, що використовуються ультразвукові сенсори. Це дозволяє значно збільшити швидкість реакції та діапазон допустимих значень, що позитивно впливає на тональний діапазон та швидкість реакції інструменту. Як додаткова перевага – з'являється можливість використання пристрою в умовах поганого освітлення або взагалі темряви, якщо є така необхідність. Крім цього, використання такого не дуже звичного способу взаємодії із користувачем додає важливий елемент зацікавлення і новизни. Також співвідношення віддаленості рук (або будь-якого об'єкту) від сенсора з гучністю і частотою тону мають доволі інтуїтивний та наочний характер. Синтез звуку відбувається за допомогою сторонніх засобів та більш просунутих алгоритмів, забезпечуючи музичну виразність за умови збереження автономності.

Автономність пристрою, окрім очевидних переваг на кшталт невисокого енергоспоживання, має важливе значення в контексті використання у

молодших класах, адже він не потребує живлення від електромережі, яка може становити певну небезпеку для дітей. Окрім небезпеки власне електромережі, відповідно, у схемі немає жодних ділянок високої напруги, вона становить усього 5 вольт постійного струму на усю схему і не є суттєво небезпечною для здоров'я, не кажучи вже про життя. Продовжуючи розмову про безпечність нашої розробки можна зазначити, що за умови грамотного розміщення деталей у достатньо міцному корпусі її також досить складно вивести з ладу за рахунок безконтактного керування, що також є важливою рисою для дитячого музичного інструменту.

Використання ультразвукових датчиків також надає потенціал до реалізації не тільки тонального звучання, а й «режиму ударних». Хоча в такому випадку реалізувати варіативність зворотного зв'язку теж буде складно, а кількість уявних педів також обмежена (наприклад, пари «близьких», «середніх» та «далеких»), проте, як додатковий режим та за умови більш просунутих схем синтезу звуку, на нашу думку, такий функціонал має право на існування в рамках базового навчання ритму.

Ще однією перевагою нашого інструменту є те, що використання двох сенсорів для звичайного тонального режиму зовсім не є обов'язковим, тож підключення другого фактору дозволяє значно урізноманітнити його. Окрім керування гучністю, як у звичайному терменвоксі, другий сенсор може відповідати, наприклад, за тональність або другий інструмент (на кшталт басу), впроваджуючи поліфонію і значно розширюючи потенціал до творчості. «Однорукий» режим може знайти своє вузьке призначення в інклюзивній освіті, враховуючи, що для керування інструментом з ультразвуковим сенсором взагалі не обов'язково має бути наявною функціонуюча кінцівка.

З огляду на озвучені переваги нашого виробу можемо дійти висновку, що він вирішує більшість з озвучених проблем, які були знайдені в ході аналізу попередньо реалізованих проєктів музичних пристроїв на мікроконтролерах.

2 ТЕОРІЯ СИНТЕЗУ ЗВУКУ

2.1 Звук як фізичне явище

У попередньому розділі здійснено аналіз актуальності розвитку музичної компетентності здобувачів початкової та середньої освіти за допомогою інноваційних технологічних засобів, а також наведено огляд і критичну оцінку наявних рішень у галузі мікроконтролерних музичних пристроїв. Проведений аналіз дозволив виявити низку важливих функціональних та педагогічних вимог до такого пристрою: безпечність, доступність, інтуїтивність, варіативність звучання, інтерактивність і мотиваційний потенціал. Водночас було визначено й типові недоліки реалізованих систем: обмежена музична виразність, чутливість до зовнішніх чинників, відсутність автономності тощо.

З огляду на це, наступним логічним кроком у процесі проектування пристрою є звернення до теоретичних основ, які пояснюють фізичні й технічні принципи синтезу звуку взагалі та засобами мікроконтролерів зокрема. Саме розуміння механізмів виникнення, перетворення та генерації звукових коливань є ключовим для обґрунтованого вибору апаратних компонентів і програмних алгоритмів, що будуть описані у третьому розділі кваліфікаційної роботи.

Почати висвітлення теоретичної сторони питання варто з опису звуку як фізичного явища. На цьому рівні він нерозривно пов'язаний із поняттями вібрацій (механічних коливань) та хвиль. У загальному розумінні звуком вважають поздовжні хвилі, що лежать у частотному діапазоні 20 Гц – 20 КГц [13], які може сприймати людське вухо. Поздовжніми ж хвилями називають такі коливання, що відбуваються вздовж напрямку розповсюдження [8]. Звукові хвилі у повітрі (власне звук, який може сприймати людина) часто наводять як класичний приклад поздовжніх хвиль. Втім, не кожна вібрація тіла

із розповсюдженням у пружному середовищі може вважатися саме музичним звуком. У електронному виданні від К. Forinash та W. Christian зазначено, що є дві основні умови генерації об'єктом саме чистого музичного тону: відсутність тертя, яке зупиняє вібрації, та виконання закону Гука [4].

Відповідно статті на Вікіпедії, закон Гука стверджує, що сила пружності, яка змушує пружне тіло коливатися у намаганнях повернутися до точки рівноваги, пропорційна до деформації цього тіла [9]. Це можна виразити наступною формулою:

$$F = -k\Delta x, \quad (2.1)$$

де знак «мінус» показує протилежний до деформації напрямок сили, k є сталим коефіцієнтом жорсткості, а Δx позначає зміну довжини. Так, залежність між ступенем деформації та силою пружності фактично є лінійним, тож сила за своєю природою також є лінійною. Саме лінійна сила пружності за умови відсутності тертя здатна утворювати прості гармонічні коливання. Такий звук сприймається вухом людини як нота, що чисто звучить на певній частоті.

З математичної точки зору графік гармонійного коливання в загальному випадку є певним видом синусоїди. Виходячи з цього, отримуємо, що «музичні» коливання є також періодичними і мають низку важливих характеристик, властивих періодичним функціям: період, частота, амплітуда, фаза та форма. Періодом називають час одного коливання, він вимірюється у секундах, тоді як частота є оберненою величиною і позначає кількість коливань, які тіло зробило за одну секунду. Ця величина вимірюється у герцах (Гц). На рисунку 2.1 показано приклад графіку функції такого руху. Частоту звукової хвилі можна називати основною її характеристикою, адже саме вона впливає по-перше на те, чи будемо ми взагалі сприймати її на слух, а по-друге на те, якій ноті вона буде відповідати. Амплітуда хвилі співвідносна з її гучністю, проте суб'єктивне сприйняття гучності також залежить і від частоти.

Варто зазначити, що графік синусоїди описує одиночні коливання, які мають лише одну гармоніку, тобто лише основний частотний тон. Більшість звуків у природі створюється накладанням багатьох подібних хвиль внаслідок безлічі вібрацій, що призводить до утворення різних форм хвилі (прямокутна, трикутна, пілкоподібна). Форма хвилі відповідає в основному за тембр інструменту. Фаза майже не впливає на сприйняття ізольованого звуку, проте є важливим параметром за умови накладання декількох хвиль, адже накладання хвиль різних фаз може давати різноманітні результати з точки зору звучання та навіть скасувати одна одну, якщо вони протилежні за фазою. Також поняття фази важливе саме у синтезі під час додавання гармонік, адже інтерференція може змінити результуючу форму хвилі.

Отже, за результатами дослідження теоретичних джерел можемо загально схарактеризувати звук як поздовжні хвилі (коливання) у пружному середовищі (зазвичай повітрі). Втім, такий опис стосується як коливань, що сприймаються як чистий звук певної частоти (нота), так і до різноманітних шумів. Тональні коливання є періодичними, описуються графіком гармонійної функції (\sin, \cos) і мають такі характеристики як період і частота, амплітуда, форма та фаза (рисунок 2.1).

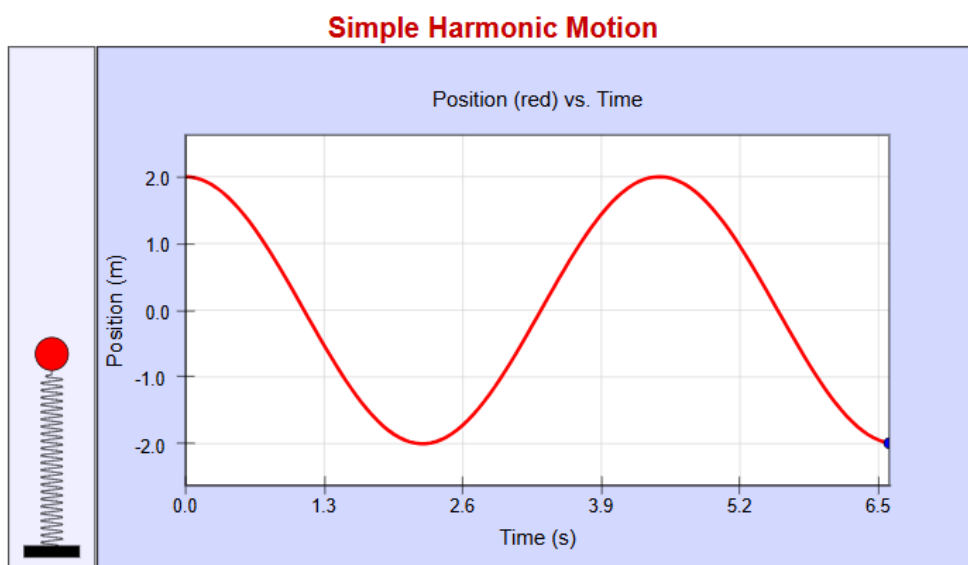


Рисунок 2.1 – Приклад гармонійного коливання

2.2 Основні поняття і процеси оцифрування звукових хвиль

Після розглядання основних характеристик звукової хвилі, таких як частота, амплітуда, форма та фаза, які відповідно впливають на висоту тону, гучність, тембр та звукові властивості за умови інтерференції з іншими хвилями, варто описати базові поняття цифрового звуку як такого.

Першою технічною проблемою оцифрування звукового сигналу є його неперервність. Як було зазначено у п. 2.1, графік гармонійного коливання є неперервним. Це означає, що на будь-якому конкретному часовому проміжку описано безліч значень сигналу. Очевидно, цифрова обробка такого сигналу є неможливою, адже в теорії потребує безлічі обчислень. Питання перетворення неперервних хвиль у обчислювані вирішують такий фундаментальний для цифрового звуку процес як дискретизація, що включає в себе семплювання та квантування [5]. Дискретизація базується на теоремі відліків Віттекера – Найквіста – Котельникова – Шеннона, запропонованій британським математиком Е. Віттекером ще у 1915 році. Ця теорема стверджує, що аналоговий сигнал із визначеною найвищою частотою f_m можливо майже точно відновити за його дискретними значеннями, вимірюваними через проміжки часу, описані нерівністю 2.2:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_m}, \quad (2.2)$$

що відповідно вказує на частоту дискретизації (вимірювання дискретних значень сигналу) $f_d \geq 2f_m$.

Якщо підсумувати це простими словами, то обмежений у частотному спектрі сигнал описується дискретними значеннями, що фіксувалися з принаймні удвічі більшою частотою, ніж найвища частота самого сигналу. Проте на практиці для сигналів, що обмежені у часі, умова фінітності (кінцевості) спектру частот ніколи не виконується, отже, доводиться обирати верхню частоту, що найкраще описує ефективну ширину спектру. Ба більше,

для уникнення спотворень частоту дискретизації обирають із деяким запасом, отже точне відновлення сигналу за дискретними значеннями є неможливим.

Оскільки у звуковій хвилі окрім частоти також є важливий для сприйняття параметр амплітуди, тобто гучності, другий етап дискретизації звуку повинен описувати зміну амплітуди. Він називається квантуванням і полягає у тому, що аналогові рівні гучності сигналу округлюються до заздалегідь визначених дискретних рівнів. Тут ми стикаємося зі ще однією важливою характеристикою дискретизації, яка називається бітовою глибиною. Саме вона визначає кількість таких рівнів. Найбільш популярними ступенями бітової глибини є 16 біт та 24 біти.

16-бітна глибина дозволяє описувати зміну амплітуди через 65,536 рівнів, тоді як 24-бітна дає аж 16,777,216 таких рівнів, забезпечуючи значно більш детальне відтворення змін амплітуди [5]. Варто зазначити, що округлення рівнів сигналу за умови глибини менше 16 біт обов'язково призводить до появи відчутних шумів, які називають квантувальними шумами. Найпростіший спосіб їх зменшити – збільшити глибину, якщо обчислювальні ресурси це дозволяють. В іншому випадку варто використовувати прийоми на кшталт дезерингу (домішування випадкового шуму, яке перетворює помітні артефакти на білий шум, який є менш помітним на фоні сигналу) або фільтрації вихідного сигналу через RC-фільтр.

Так, уявлення про механізми оцифрування звуку, викладені у цьому пункті є передумовою розуміння основних понять синтезу звуку, зокрема синтезу звуку засобами мікроконтролерів, а також його алгоритмів. У пункті було розглянено підґрунтя такої фундаментальної складової дискретизації як семплювання, а саме теорему відліків. Вона стверджує, що для відновлення форми аналогового (неперервного) сигналу достатньо мати набір його дискретних значень, зафіксованих із частотою, що більша за найвищу частоту спектра принаймні в два рази. Для цифрового представлення зміни амплітуди сигналу після семплювання проводиться його квантування, тобто наближення значень амплітуди до визначених бітовою глибиною дискретизації ступенів.

Найпоширенішими значеннями бітової глибини є 16-бітна та 24-бітна. Такий процес неминуче призводить до появи артефактів, що можуть бути усунені підвищенням бітності або використанням прийомів для маскуванню шуму на кшталт дезерингу.

2.3 Синтезатори і методи синтезу звуку

Після розгляду необхідних теоретичних понять, що стосується оцифрування звукових хвиль, можемо перейти до опису явища їхнього синтезу. Синтез звуку – це процес штучного створення звукових хвиль за допомогою електричних генераторів коливань і його подальша обробка різноманітними фільтрами з метою створити унікальне звучання або повторити звук аналогових музичних інструментів. Відповідно, синтезатор можна визначити як аналоговий, електронний або програмний пристрій, який здатний створювати звукові хвилі [2]. Базовими складовими будь-якого синтезатора є: осцилятор, фільтр, огинаюча та модулятор, а також керуючий інтерфейс. Перейдемо до поступового опису цих складових.

Осцилятор – електронний пристрій, який генерує звукові хвилі за допомогою швидкої послідовної зміни своїх станів. Такі хвилі зазвичай містять лише основний тон, а для їхнього збагачення необхідно використовувати інші елементи синтезатора. Найбільш використовуваними типами форм хвиль є синусоїдна, трикутна, пилкоподібна та квадратна [2]. Форма хвилі впливає на її тембр, відповідно, синусоїдна хвиля дає чистий, «округлий» звук, трикутна робить більший акцент на вищих частотах, пилкоподібна звучить більш приглушено та із вираженими середніми частотами, а квадратна дає «порожнє, металічне звучання». Відповідні види хвиль наведено на рисунку 2.2.

Другою складовою синтезатора є фільтр. Фільтри призначені для «вирізання» певних частот із хвиль, які генерує осцилятор з метою формування складнішого за звучанням сигналу. Вони поділяються на три

основні види, а саме – низьких частот, високочастотні та смугові. Такі фільтри призначені для видалення спектру низьких, високих частот та певного визначеного частотного інтервалу відповідно.

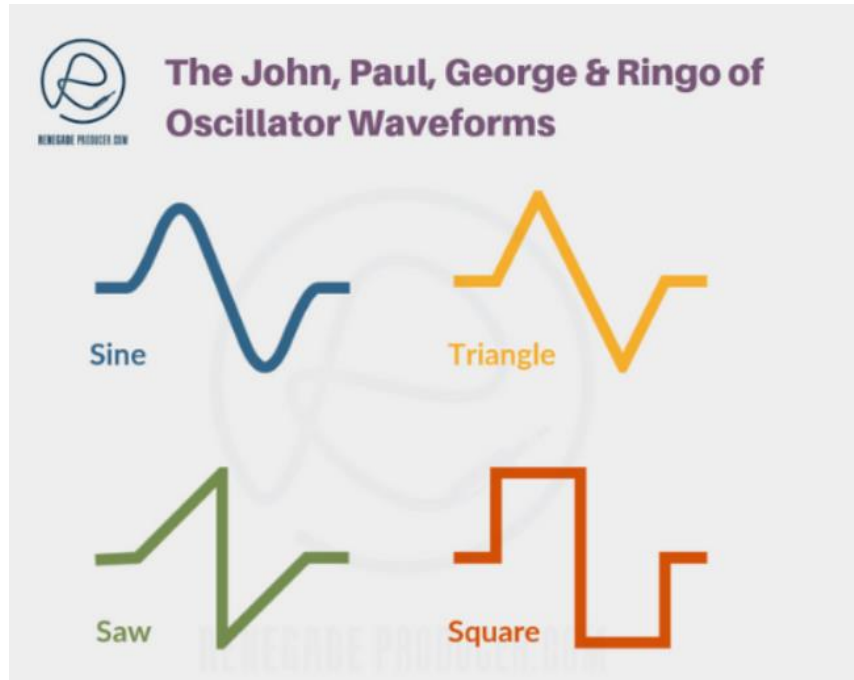


Рисунок 2.2 – Найпоширеніші форми звукових хвиль

Огинаюча призначена для керування динамікою хвилі. Зазвичай зміна динаміки кожного звуку складається з чотирьох етапів: атака (наростання від початкової до максимальної амплітуди сигналу), спадання (зниження з максимальної амплітуди до рівня підтримки), підтримка (гучність сигналу, що залишається незмінною під час звучання ноти) та затухання (зниження до нуля). Крім амплітуди, огинаюча може також бути застосована наприклад до висоти тону за допомогою модулятора.

Модулятор як складова синтезатора відповідає за зміну властивостей сигналу у часі шляхом відправки контролюючих сигналів до осциляторів та фільтрів. Існують модулятори огинаючої, що керують динамікою амплітуди та, наприклад, LFO (низькочастотні осцилятори), які дозволяють імітувати ефект вібрато або тремоло [10]. Також до складу синтезатору входить контролер, який ще називають керуючим інтерфейсом. Він виконує функцію

передачі даних від користувача до електронних компонентів. Зазвичай таким контролером є клавіатура, подібна до фортепіанної, проте тип контролера залежить від типу синтезатора. У загальному вигляді алгоритм формування звуку виглядає так: контролер реєструє певну подію та передає сигнал до осцилятора, що створює базову хвилю. Потім фільтри змінюють її частотний спектр, вирізаючи певні смуги частот, а за допомогою модулятора до сигналу застосовується графік огинаючої, який описує зміну гучності тону у часі. Усі ці кроки допомагають отримати сигнал зі складною формою і динамікою.

Тепер можемо перейти до опису видів синтезу звуку. Для реалізації кожного з них є свій алгоритм та використовувані компоненти синтезатора, отже, вони мають різну складність реалізації та ресурсоємність. Виділяють п'ять основних типів синтезу: адитивний, субтрактивний, FM-синтез, синтез методом хвильових таблиць та фізичний [17]. Опишемо кожний із них послідовно, щоб мати змогу обрати ті, які підходять найбільше з огляду на апаратні обмеження.

Сутність адитивного синтезу полягає у створенні великої кількості складних хвиль із різними параметрами, що при накладанні формують унікальну складну результуючу хвилю. Потребує усіх компонентів синтезатора у великій кількості для одночасної генерації багатьох хвиль, отже, дуже складно реалізується на Arduino і не підходить для використання у проєкті. Те ж саме стосується і фізичного синтезу, сутність якого полягає у використанні потужних процесорів для моделювання реальних фізичних процесів, що відбуваються всередині інструментів і внаслідок технічних обмежень обраної платформи не можуть бути реалізовані на ній.

Субтрактивний синтез є певною мірою протилежним до адитивного, адже там спочатку створюється спектрально багата хвиля, яку модифікує фільтр для досягнення бажаного результату [17]. Для реалізації такої обробки сигналу достатньо лише осцилятора та фільтра, що робить цей метод досить економним і придатним для використання у мікроконтролерах, коли потрібний синтез «на льоту» без використання заздалегідь збереженої

інформації.

FM-синтез спирається на частотну модуляцію сигналу за незмінюваної амплітуди і потребує наявності осцилятора і модулятора для синтезу хвиль. Часто використовується у класичних синтезаторах, так як дає насичений звук, проте є дуже чутливим до зміни параметрів, потребує чіткого таймінгу та швидких обчислень, що робить його обмежено придатним до реалізації в умовах 8-бітних AVR-мікроконтролерів. Нарешті, синтез методом хвильових таблиць є найбільш економним до ресурсів методом і значною мірою реалізований у бібліотеках для Arduino. Форма хвилі зазвичай записана заздалегідь у вигляді масиву (таблиці) значень, звідки метод і бере свою назву. Із використанням фільтрів та модуляторів можна досягти перетворення записаної форми хвилі на довільну. Серед недоліків такого методу можна визначити обмежену гнучкість та навантаження на пам'ять за умови великої кількості форм хвиль, які необхідно використовувати.

У пункті було розтлумачене поняття «синтезатор», наведено структуру синтезаторів, які загалом складаються із осцилятора, фільтра, модулятора та огинаючої. В результаті аналізу найпопулярніших методів синтезу доходимо висновку, що серед описаних (адитивний, субтрактивний, частотна модуляція та хвильові таблиці) найбільш доречним способом формування звуку у реальному часі буде синтез хвилі табличним осцилятором на основі хвильових таблиць.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРИЛАДУ

3.1 Формулювання технічного завдання

За результатами теоретичного аналізу різноманітних джерел у першому розділі, нами було визначено актуальність розробки інноваційних пристроїв для формування музичної компетентності здобувачів початкової освіти, а також описано наявні на ринку альтернативи у цій галузі із зазначенням їхніх основних недоліків. Це дозволило сформулювати початкові вимоги до виробу, реалізованого в рамках цієї роботи. Такими вимогами є нестандартне керування, автономність, порівняно компактні розміри, невисока вартість, відсутність необхідності підключення до електромережі високої напруги, музична виразність. Ці вимоги також продиктували вибір апаратної платформи, а саме Arduino. Висвітлення теоретичного матеріалу стосовно аналогового синтезу у другому розділі також допомогли визначитися із двигуном для синтезу звуку, а саме Mozzì. В результаті стає можливим формулювання технічного завдання, як описано нижче.

1. Функціональні вимоги:

- основна взаємодія за допомогою ультразвукових датчиків;
- генерація звуку з параметрами, пропорційними до проведених датчиками вимірів;
- відображення інформації на рідкокристалічному дисплеї;
- наявність кнопок для керування параметрами звуку;
- живлення від батарейки 9В типу «Крона».

2. Експлуатаційні вимоги:

- інтуїтивна зрозумілість, мінімум елементів керування;
- надійність роботи в умовах освітнього середовища;
- безпечність та міцність конструкції;
- автономність.

3. Експлуатаційні обмеження:

- за габаритами: не більше 20x15x10, щоб пристрій легко поміщувався на парті;
- за часом вмикання: не більше 3 секунд після натискання на кнопку або подачі живлення
- за часом відгуку: не більше 100мс для комфортної гри;
- за точністю вимірювання: відстань до 50 см, точність - ± 1 см.

На основі зазначених функціональних та експлуатаційних вимог формується функціональна специфікація, що наведена нижче.

1. Безконтактне керування звуком:

- а) ультразвукові сенсори керують основними параметрами звуку;
- б) звук синтезується в реальному часі.

2. Відображення інформації:

- а) на рідкокристалічному дисплеї в реальному часі оновлюються дані про поточний режим, ноту що грає, активний сенсор та гучність.
- б) дисплей оновлюється лише за потреби, щоб не перевантажувати процесор.

3. Керування режимами та параметрами звуку:

- а) регулювання гучності, інтервалу відносно основної ноти у поліфонічному режимі за допомогою потенціометра;
- б) тактова кнопка для перемикання режимів;
- в) кнопка з утриманням для перемикання додаткових параметрів.

Ґрунтуючись на функціональній специфікації у підсумку можемо схарактеризувати ключові риси розробленого пристрою: невисока вартість компонентної бази, компактність, стійкий корпус проста та зрозуміла мова програмування мікроконтролера, підтримка поліфонії для створення необхідного рівня музичної виразності, проста принципова схема.

3.2 Технічна специфікація та схема пристрою

Розроблений пристрій є навчальним інструментом, призначеним для використання в освітньому середовищі з метою формування музичних навичок і розвитку музичної компетентності в дітей молодшого шкільного віку. Завдяки безконтактному керуванню та візуальній зворотній інформації пристрій сприяє розвитку інтересу до музики й формує уявлення про висоту тону, частоту та просторову координату. Основні складові продукту та їхня середня вартість зазначені в таблиці (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Складові компоненти проекту та розрахунок його вартості

№	Найменування компонента	Призначення компонента	Ціна, грн
1	Мікроконтролер Arduino Nano	Синтез звуку, керування введенням-виведенням	180
2	Ультразвукові датчики HC-SR04	Вимірювання відстані до руки гравця	100 (x2)
3	Динамік	Виведення звуку	10
4	LCD-екран 16x2 з I ² C	Виведення графічної інформації	110
5	Потенціометр на 10 кОм	Керування звуком	50
6	Тактова кнопка	Керування режимами	20
7	Кнопка з утриманням	Перемикання дод. режимів	5
8	Плата живлення	Живлення конструкції	50

Можна порахувати, що орієнтовна вартість розробки згідно таблиці сягає 525 грн. Для зручності цю суму можна округлити до 550 грн за екземпляр інструменту, що не набагато більше за вартість іграшкових синтезаторів. Втім, наша розробка надає значно більші можливості з точки зору багатства звучання, а також є більш наочною завдяки вбудованому рідкокристалічному дисплею. Мікроконтролер був обраний з огляду на вимоги компактності,

простоти розробки програм, монтажу та демонтажу на плату для прототипування, на якій був зібраний пристрій, а також з метою полегшити модифікування або відновлення прошивки за необхідності, чому також сприяє наявність порта USB типу B.

Arduino Nano належить до родини мікроконтролерів Arduino, що в основному використовуються для навчання початківців основ проектування мікроконтролерних пристроїв. Більшість з них, принаймні найдешевші варіанти, побудовані на основі чипів ATmega 8/16/32 архітектури AVR.

Технічні характеристики платформи Arduino Nano є такими: МК ATmega 328P від Atmel з тактовою частотою 16мГц, рекомендована напруга живлення в діапазоні від 7 до 12В (дозволяється до 20В, але це є граничною напругою), 14 цифрових входів-виходів, з яких D0 та D1 використовуються для послідовного інтерфейсу, 8 аналогових входів, 32КБ флеш-пам'яті на скетч, з яких 2кб займає завантажувач, 2КБ оперативної пам'яті типу SRAM та 1КБ енергонезалежної пам'яті. Схема входів-виходів мікроконтролера розташована на рисунку нижче (рисунок 3.1).

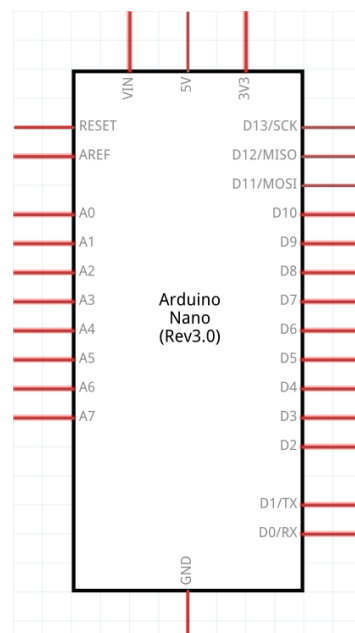


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення обраного мікроконтролера

Основними характеристиками ультразвукових датчиків HC-SR04

(рисунок 3.2) є максимальна дальність вимірювання у 50 сантиметрів та живлення від 5В.



Рисунок 3.2 – Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Діаметр обраного динаміка сягає 5,5 см, а опір дорівнює 8 омам. Потужність динаміка становить 0,5 ват. Рідкокристалічний дисплей для відображення є аналогом HD44780, містить 16 пінів, до яких підпаяний розширювач портів введення-виведення PCF8574, який дозволяє керувати дисплеєм за допомогою всього двох входів мікроконтролера за протоколом I2C, що істотно зменшує кількість необхідних портів. Плата живлення використовується для вирівнювання напруги елемента типу «Крона» з 9В до рекомендованих 5В, а також можливості вмикати та вимикати пристрій за натисканням кнопки. Схема наведена на рисунку (рисунок 3.3).

3.3 Програмна частина розробки

На основі уточнення технічного завдання та з урахуванням специфіки вибраних компонентів розроблено керуючий код. Серед функції, реалізацію яких він забезпечує, слід зазначити зчитування ультразвукових сенсорів, реагування на потенціометр та натискання кнопок, вивід інформації на екран. Сучасний цикл розробки мікроконтролерних систем передбачає, що безпосередньо перед написанням програми слід розробити її алгоритм (рисунок 3.4).

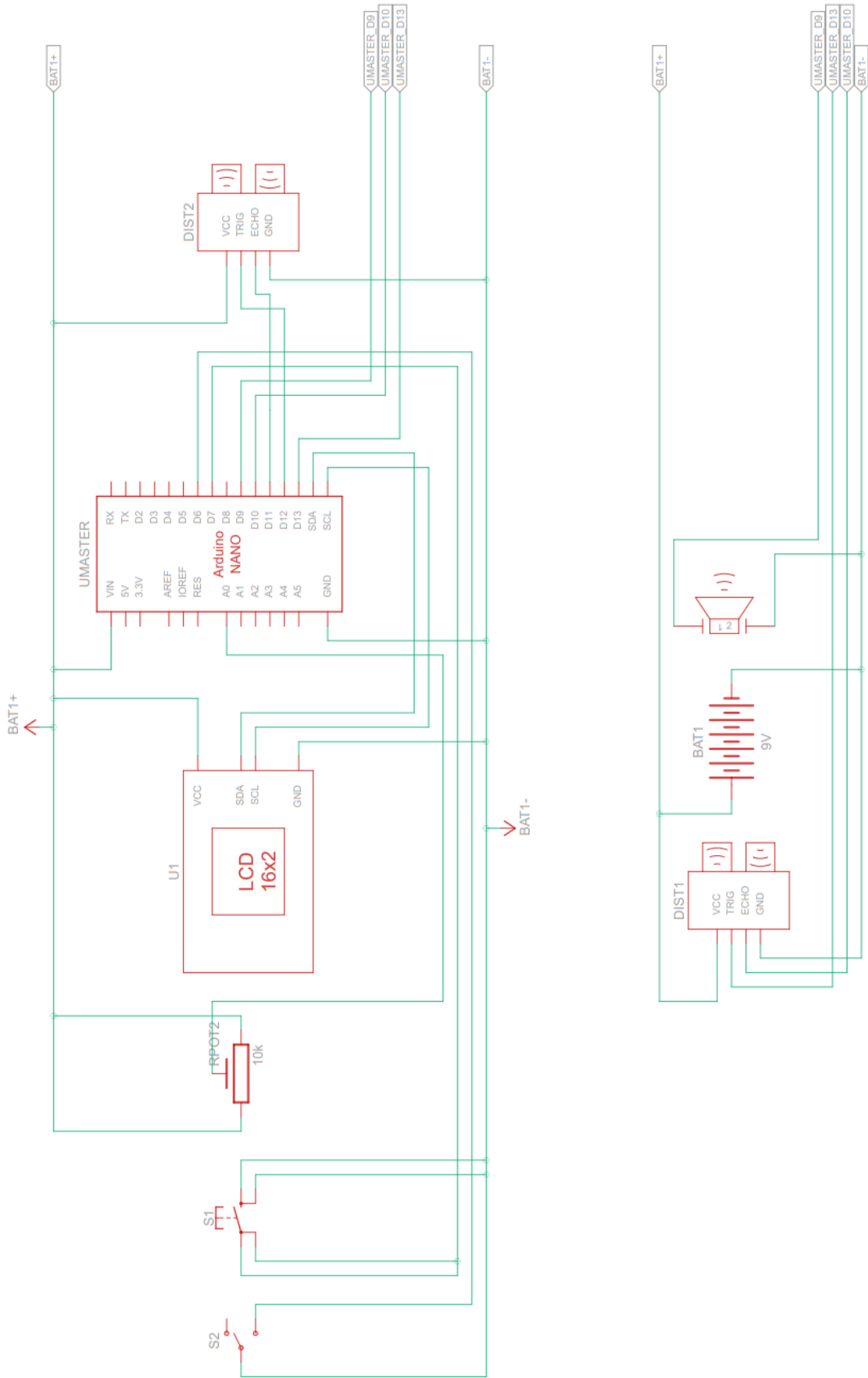


Рисунок 3.3 – Принципова схема електричних з'єднань пристрою

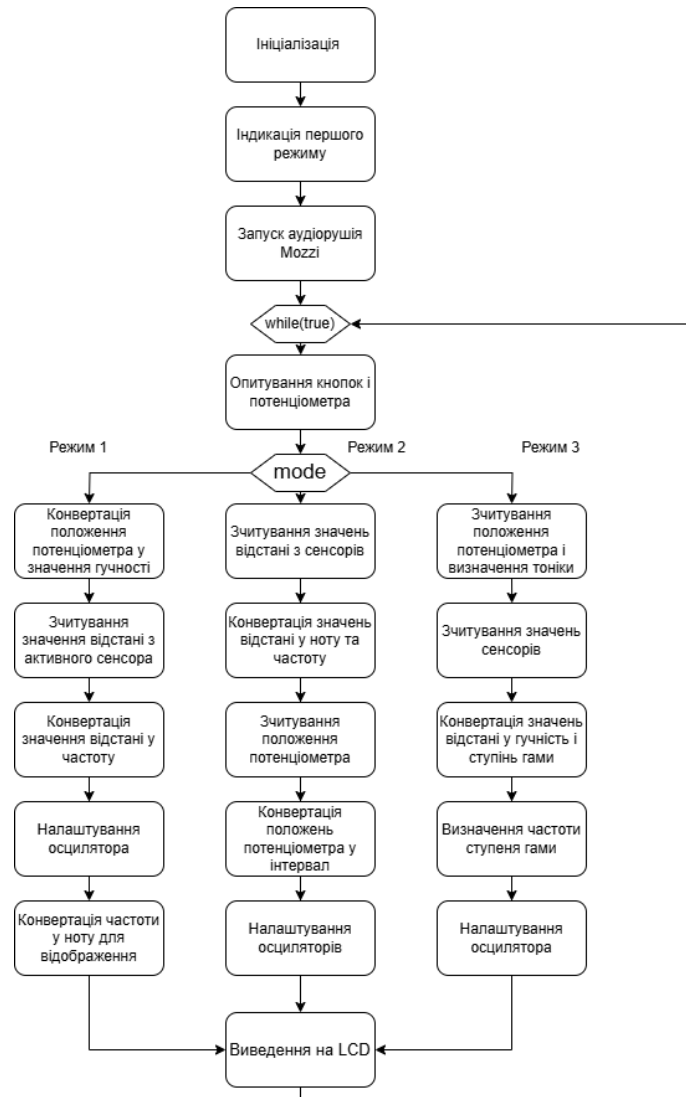


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму керуючого коду МК

Для розробки та відлагодження використовувалось стандартне для Arduino середовище Arduino IDE (рисунок 3.5), модифіковане IDE Java-подібної мови Processing [15]. Мова C++ була обрана з міркувань створення компактного та зрозумілого коду (ідентичний код на асемблері або Сі займає у декілька разів більше строк), а також з огляду на відсутність жорстких обмежень за розміром програми.

Під час написання програми першою проблемою стала адаптація бібліотеки опитування ультразвукових сенсорів NewPing за авторством Т. Eskel [6], адже вона спирається на блокуючі функції та функції таймерів на кшталт `delay()` або `micros()`, які заважають бібліотеці для генерації звуку Mozzi,

як зазначено у документації на неї [3]. Відповіддю стала власноруч нами модифікована версія бібліотеки під назвою MozziPing, де фрагменти використання функції `micros()` були замінені на спеціальний аналог від розробників аудіодвигуна (лістинг 3.1).

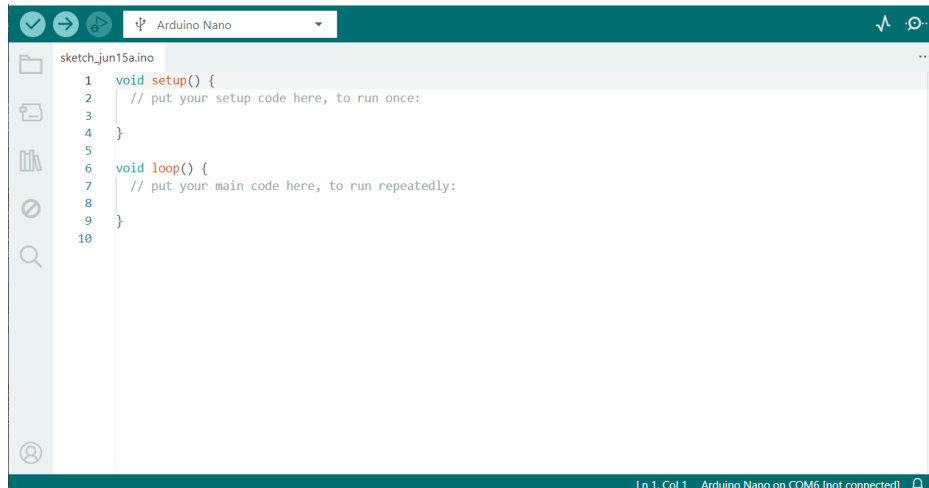


Рисунок 3.5 – Середовище розробки Arduino IDE

Лістинг 3.1 – Фрагмент функції `ping()` з бібліотеки MozziPing

```
unsigned int MozziPing::ping(unsigned int max_cm_distance) {
    if (max_cm_distance > 0) set_max_distance(max_cm_distance);
    if (!ping_trigger()) return NO_ECHO;
#if URM37_ENABLED == true
    #if DO_BITWISE == true
        while (!(*_echoInput & _echoBit)) { //Чекаємо на відбиття
            audioHook(); //Підтримуємо частоту виклику audioHook()
            if (mozziMicros() > _max_time) return NO_ECHO;
        }
    #else
        while (!digitalRead(_echoPin)) {
            audioHook();
            if (mozziMicros() > _max_time) return NO_ECHO;
        }
    #endif
#endif
}
```

Після вдалої модифікації другої за важливістю для програми бібліотеки окрім Mozzi втілення решти блок-схеми у код загалом не викликало труднощів. Програма розділена для зручності читання на 5 файлів, розміщених у додатку Б. З них один заголовочний (therduino.h) із визначеннями важливих констант, списком імпортованих бібліотек та прототипами функцій, а інші – master.ino, therduino_controls.ino, therduino_conversions.ino, therduino_graphics.ino є вихідними файлами. У скетчі master.ino оголошуються основні масиви та змінні, ініціалізується об'єкт рідкокристалічного екрану та ультразвукові датчики. Скетчі з використанням Mozzi мають особливу структуру: вони обов'язково повинні містити окрім функцій setup() і loop(), стандартних для Arduino, функції updateControl(), що замінює собою loop() у стандартних скетчах, тобто містить основний код, а також updateAudio(), яка проводить обчислення звукової хвилі із заданими параметрами. У циклі loop() скетчу Mozzi викликається лише функція audioHook(), де згідно документації і відбувається синтез звуку. У файлі therduino_conversions.ino містяться реалізації функцій перетворення значень, наприклад, коефіцієнту ступеня гами за відстанню (лістинг 3.2).

Лістинг 3.2 – Функція getScaleDegreeFromDistance()

```
byte getScaleDegreeFromDistance(int dist) {
    const byte numDegrees = 7;
    dist = constrain(dist, MIN_DIST, MAX_DIST); //Обмежуємо значення
відстані
    float norm = (float)(dist - MIN_DIST) / MAX_DIST; //Нормалізуємо
значення відстані
    byte degree = (byte)(norm * numDegrees); //Отримуємо інтервал
    if (degree >= numDegrees) degree = numDegrees - 1;
    return degree;
}
```

Функція therduino_controls.ino містить реалізації обробки кнопки, перемикача та функцію зміни режиму (лістинг 3.3).

Лістинг 3.3 – Функція switchMode()

```

short switchMode() {
    if (mozziMicros() - lastChangeTime > UPD_INT) {
        byte buttonState = digitalRead(MODE_BUTTON_PIN);
        if (buttonState != lastButtonState) {
            lastChangeTime = mozziMicros();
            lastButtonState = buttonState;
            if (buttonState == LOW) {
                return (mode + 1) % mode_count; //Змінюємо режим лише коли
                зміна логічного рівня триває довше ніж брязкіт контактів
            }
        }
    }
    return mode;
}

```

У файлі `therduino_graphics.ino` міститься головна функція оновлення екрану `drawMode`, що перевіряє, чи відбулися зміни за допомогою функції `checkDisplayChanges()`, яка повертає тип зміни. В залежності від цього у трьох функціях виведення, яким під час виклику з `drawMode()` надається режим, для різних режимів очищуються специфічні місця і друкується нове значення, що дозволяє не очищувати екран постійно і заощаджує ресурси процесора.

Так, в результаті розробки програмної частини продукту отримали модульний код, який керує усіма складовими розробки за заздалегідь визначеним та проілюстрованим на початку пункту алгоритмом. Для отримання готового продукту залишається лише скомпілювати код і прошити його у мікроконтролер. Готова прошивка займає 18КБ ПЗП та 1530 байт SRAM.

4 ОПИС РОЗРОБКИ

4.1 Демонстрація приладу

В ході розробки нашого пристрою він переважно мав вигляд прототипу, зібраного на макетній платі. По досягненню стабільних результатів роботи виробу нами було прийняте рішення про створення для нього корпусу з метою надання більш естетичного вигляду, підвищення зручності експлуатації та компактності.

Під час вибору матеріалу для корпусу основними критеріями були: легкість в обробці, достатня витривалість проти механічних пошкоджень, нетоксичність, безпечність. Крім цього важливим аспектом була перероблюваність з метою відповідності розробки до ідей сталого розвитку і мінімізації шкоди від виробу для довкілля. Конструктивно корпус пристрою складається з окремих граней, які збираються у паралелепіпед завдяки шиповому з'єднанню без використання інструментів. Верхня грань виконує роль рухомої кришки-засувки, яка приховує схемотехніку та кнопку вмикання приладу. Такий підхід дозволяє за необхідності легко дістатися до компонентів розробки, а за необхідності навіть розібрати її на складові, що забезпечує наявність всередині контактної плати для прототипування (брідборду).

Складові (екран, датчики, кнопки) тримаються завдяки підігнаним розмірам, що дозволяє легко вставляти і виймати їх за потреби. Це трохи зменшує міцність та захищеність приладу, проте не становить суттєвої проблеми за умови належної експлуатації. В результаті отримуємо повністю модульний пристрій, що дозволяє легкий ремонт, вивчення принципу роботи та модифікацію, які є важливими складовими освітньої цінності розробки.

З точки зору керуючої програми прилад налічує три режими роботи (однорукий, дворукий та тональний), які відрізняються використовуваними

сенсорами, ролями перемикача та сенсорів, кількістю осциляторів, що формують звук.

У однорукому режимі синій перемикач (кнопка з утриманням) керує активним сенсором, з якого зчитується відстань, що впливає на висоту ноти. Потенціометр у цьому режимі керує гучністю, що відображається у вигляді від одного до п'ятьох (в залежності від рівня) заштрихованих сегментів дисплею. Осцилятор у цьому режимі один, синусоїдальний. У другому режимі гучністю замість потенціометра керує другий датчик відстані, натомість потенціометр має 5 позицій (велика і мала терції, кварта, квінта, октава) і впливає на коефіцієнт інтервалу ноти відносно тоніки, що задається другим сенсором. Її одночасно із синусоїдальним грає пилкоподібний осцилятор, створюючи виразний, насичений звук і демонструючи здатність аудіодвигуна відтворювати поліфонічне звучання. Перемикач змінює ролі сенсорів місцями, відображається на екрані при цьому літера, відповідна частотному сенсору.

Тональний режим дозволяє відтворювати ступені гами замість прямої конвертації відстані у частоту, що робить цей режим найбільш мелодійним та простим для гри. Тоніка обирається поворотом потенціометра, перемикач змінює послідовність ступенів з мажорної на мінорну і навпаки. Другий сенсор керує гучністю звуку. Осцилятор у цьому режимі також один і він синусоїдальний. Натискання другої (тактової) кнопки змінює режими по колу.

4.2 Інструкція користувача

Цей пристрій є цифровим аналогом терменвоксу – електронного музичного інструмента, що керує властивостями звука на основі положення рук гравця. Він реалізований на базі МК Arduino Nano з використанням ультразвукових сенсорів для безконтактного керування висотою та гучністю звуку.

Корпус виготовлений з деревини та складається з окремих граней, що

утворюють паралелепіпед. Верхня грань є рухомою кришкою-засувкою, яка дозволяє отримати доступ до електронної частини пристрою, зокрема до кнопки живлення. На передній грані розташовано екран для відображення інформації, кнопку перемикання режимів, перемикач типу гами (мажор/мінор) та потенціометр. На бокових гранях вмонтовано ультразвукові сенсори. На задній грані розміщено динамік.

Увімкнення пристрою:

- відкрити верхню кришку пристрою;
- увімкнути живлення натисканням на кнопку;
- закрити кришку.

Є три режими роботи пристрою.

Режим 1: безконтактне керування лише частотою звуку, перемикання активного сенсора перемикачем, потенціометр керує гучністю.

Режим 2: безконтактне керування амплітудою та частотою звуку, потенціометр керує гармонійними інтервалами другого осцилятора.

Режим 3: відтворення ступеней гами, перемикач відповідає за мажорний або мінорний звукоряд, потенціометр обирає тоніку.

На екрані відображається режим, активний сенсор (ліворуч або праворуч), поточна нота та рівень гучності у вигляді графічного індикатора.

Висота звуку змінюється відповідно до відстані між активною рукою користувача та ультразвуковим сенсором, що ближче рука – то нижче нота або більше гучність у випадку сенсора рівня звуку.

Перед завершенням роботи рекомендовано вимкнути живлення та закрити верхню кришку.

ВИСНОВКИ

Метою виконання представленої кваліфікаційної роботи було створення інноваційного пристрою для синтезу звуку, призначеного для розвитку музичної компетентності здобувачів початкової та середньої освіти на базі мікроконтролера.

Основними вимогами щодо розробки, що були визначені в ході теоретичного аналізу наявних на ринку рішень, можна назвати доступність, просту схему, інтуїтивну зрозумілість інтерфейсу, інформативність відображуваного на екрані, а також музичну виразність, яка в нашому контексті характеризується поліфонією. Крім цього пристрій повинен бути автономним, тобто не потребувати жодних додаткових засобів для гри, таких як, наприклад, комп'ютер. Було визначено, що саме відсутність таких рис, як музична виразність і автономність суттєво впливають на освітній потенціал попередніх розробок.

Пристрій, спроектований та реалізований в ході цієї кваліфікаційної роботи має усі перелічені риси і є унікальним як для українського, так і для іноземних ринків. В освітньому процесі ХНУРЕ прилад може використовуватися як цікавий наочний приклад роботи зі звуком та датчиками відстані в асинхронному режимі. Через необхідність компромісу між вартістю готового продукту, а отже зокрема і потужністю мікроконтролера, обраній апаратній платформі ATmega 328P періодично бракує обчислювальних потужностей для одночасного швидкого опитування обох датчиків відстані та синтезу звуку в реальному часі. Це може бути вирішено шляхом додавання другого мікроконтролера або зміни МК на більш потужний. Проте подібні вдосконалення схеми неминуче призводять до стрімкого подорожчання пристрою, що шкодить одній з головних його переваг в освітньому контексті. Зважаючи на реалізацію найнеобхідніших функцій і експлуатацію МК на межі можливостей, завдання роботи можна вважати виконаним.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Arduino Instruments. *Arduino - Home*. URL: <https://www.arduino.cc/education/arduino-instruments/> (date of access: 17.05.2025).
2. Audio Synthesis 101 for Music Producers - Synthesizer Basics. *RenegadeProducer.com*. URL: <https://www.renegadeproducer.com/audio-synthesis.html> (дата звернення: 03.06.2025).
3. Compatibility Issues. *Mozzi*. URL: <https://sensorium.github.io/Mozzi/#compatibility-issues> (дата звернення: 15.06.2025).
4. Forinash K., Christian W. Sound: An Interactive eBook :: Physics of Vibrations. *Compadre Portal*. URL: <https://www.compadre.org/books/?ID=46&FID=45039> (дата звернення: 26.05.2025).
5. Introduction to audio data - Hugging Face Audio Course. *Hugging Face – The AI community building the future*. URL: https://huggingface.co/learn/audio-course/chapter1/audio_data (дата звернення: 29.05.2025).
6. NewPing. *Bitbucket | Git solution for teams using Jira*. URL: <https://bitbucket.org/teckell2/arduino-new-ping/> (дата звернення: 15.06.2025).
7. Processing – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Processing> (дата звернення: 15.06.2025).
8. The effects of music composition as a classroom activity on engagement in music education and academic and music achievement: A quasi-experimental study / M. Hogenes et al. *International Journal of Music Education*. 2015. Vol. 34, no. 1. P. 32–48. URL: <https://doi.org/10.1177/0255761415584296> (date of access: 10.05.2025).
9. Бухнієва О. А., Банкул Л. Д. Потенціал інноваційних технологій у мистецькій освіті. *Теорія і методика професійної освіти*. 2019. Т. 1, № 10. С. 112–114.
10. Генератор низьких частот – Вікіпедія. *Вікіпедія*.

URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Генератор_низьких_частот (дата звернення: 12.06.2025).

11. Дудик Р. В. ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ КЛАСИЧНОЇ МУЗИКИ НА ФОРМУВАННЯ ОСОБИСТОСТІ ДІТЕЙ. *Вісник Запорізького національного університету. Педагогічні науки*. 2020. № 2. С. 187–192. URL: <https://doi.org/10.26661/2522-4360-2020-2-29> (дата звернення: 08.05.2025).

12. Закон Гука – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Закон_Гука (дата звернення: 27.05.2025).

13. Звукові хвилі - Коливання й хвилі - ЕЛЕКТРОДИНАМІКА - УСІ УРОКИ ФІЗИКИ 11 КЛАС - конспекти уроків - План уроку - Конспект уроку - Плани уроків - розробки уроків з фізики - ФІЗИКА. *Віртуальна читальня освітніх матеріалів*. URL: <https://subjectum.eu/lesson/physics/11klas/31.html> (дата звернення: 26.05.2025).

14. Малашевська І. А. Теорія і практика навчання музики дітей дошкільного та молодшого шкільного віку з використанням музикотерапії : дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.02. Київ, 2017. 439 с.

15. Поздовжня хвиля – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Поздовжня_хвиля (дата звернення: 26.05.2025).

16. Про затвердження Державного стандарту початкової освіти : Постанова Каб. Міністрів України від 21.02.2018 № 87 : станом на 6 жовт. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/87-2018-п#Text> (дата звернення: 10.05.2025).

17. Синтезатор – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Синтезатор> (дата звернення: 12.06.2025).