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)

Пристрій аналізу звукового спектра
на базі Arduino з OLED-дисплеєм

(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи КІУКІ-21-1
Андрій КАЛІБЕРДА
(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: доц. Олексій ПІСКАРЬОВ
(посада, власне ім’я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ЕОМ _____ Андрій КОВАЛЕНКО
(підпис) (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 Каліберді Андрію Сергійовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Пристрій аналізу звукового спектра на базі Arduino з OLED-дисплеєм

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. Завдання на кваліфікаційну роботу
2. Перелік вимог до проєктованої системи
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи
4. Аналіз джерел
5. Публікація

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі

1. Аналіз поставленої задачі
2. Аналіз існуючих методів вирішення задачі
3. Проєктування та розробка структури проєкту
4. Аналіз та вибір ключових апаратних та програмних засобів реалізації
5. Основна реалізація
6. Висновки

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

1. Рисунки до реалізації та аналізу проєкту
2. Таблиця параметрів подразнення і параметрів відчуття
3. Структурна схема проєкту
4. Презентація проєкту кваліфікаційної роботи
5. Опубліковані тези у науковій конференції

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	Отримання завдання	26.05.2025	
2	Аналіз існуючих методів вирішення задачі	30.05.2025	
3	Реалізація поставленої задачі	31.05.2025	
4	Аналіз отриманих результатів	02.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	05.06.2025	

Дата видачі завдання " 26 " травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Олексій ПІСКАРЬОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 79 с., 28 рис., 1 табл., 3 дод., 9 джерел.

МІКРОКОНТРОЛЕР, IoT, ДАТЧИК, СЕНСОР, ДИСПЛЕЙ, ЗВУК, ПОТІК, СИГНАЛ, ІНТЕРНЕТ.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка пристрою з використанням сучасних цифрових технологій та розробка ефективної системи для аналізу звукового спектра на базі мікроконтролера Arduino.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено огляд теоретичних основ звукового спектрального аналізу, зокрема методів швидкого перетворення Фур'є (FFT), а також вивчено можливості застосування недорогих апаратних засобів, таких як Arduino, ESP32 та Raspberry Pi, для реалізації спектрального аналізу в реальному часі. Розроблено програмне забезпечення, що дозволяє з високою точністю виявляти частотні компоненти звуку, а також аналізувати гармоніки, шуми та аномальні зміни у звукових сигналах. Запропоновані підходи можуть бути використані для моніторингу технічного стану обладнання, екологічного контролю у сфері IoT для формування «розумних» систем, здатних автоматично реагувати на звукові події.

ABSTRACT

Bachelor’s thesis: 79 pages, 28 figures, 1 tables, 3 appendices, 9 sources.

MICROCONTROLLER, IoT, SENSOR, DISPLAY, SOUND, FLOW, SIGNAL, INTERNET.

The major goal of this thesis is the development of a device using modern digital technologies and the creation of an efficient system for sound spectrum analysis based on the Arduino microcontroller.

During the course of the qualification work, a review of the theoretical foundations of sound spectral analysis was conducted, particularly methods of Fast Fourier Transform (FFT). Additionally, the potential of using low-cost hardware such as Arduino, ESP32, and Raspberry Pi for real-time spectral analysis was explored. Software was developed that allows for highly accurate detection of the frequency components of sound, as well as the analysis of harmonics, noise, and abnormal changes in audio signals. The proposed approaches can be used for monitoring the technical condition of equipment, environmental control in the field of IoT, and for building "smart" systems capable of automatically responding to sound events.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ 7
ВСТУП 8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ..... 9
1.1 Звук як подія і його потік 20
2 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ..... 24
2.1 Вибір мікроконтролеру, основних датчиків і сенсорів 36
2.2 Інтеграція з іншими системами та пристроями 44
3 ТЕСТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ..... 50
ВИСНОВКИ..... 52
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 53
ДОДАТОК А..... 54
Лістинг виконавчої програми мікроконтролеру 54
Лістинг підключення та взаємодії сенсорів та датчиків: 58
ДОДАТОК Б Публікації 60
ДОДАТОК В Графічна частина кваліфікаційної роботи..... 72

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FFT – Fast Fourier Transform (швидкого перетворення Фур’є)

IoT – Internet of Things (Інтернет речей)

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport (Протокол телеметрії з чергуванням повідомлень)

OLED – Organic Light Emitting Diode (Органічний світлодіод)

TFT – Thin-Film Transistor (Тонкоплівковий транзистор)

ВСТУП

Аналіз звукового спектра є важливим завданням у багатьох галузях науки та техніки, включаючи акустику, телекомунікації, системи розпізнавання мовлення, медичну діагностику, електронну музику, а також моніторинг стану технічних систем. Завдяки звуковому спектральному аналізу можна отримати глибоке розуміння структури й характеристик сигналів, зокрема виявити приховані гармоніки, шуми та аномальні зміни, що мають критичне значення для наукових досліджень та прикладних задач.

Сучасні цифрові методи аналізу сигналів, серед яких особливо вирізняється швидке перетворення Фур’є (FFT), дозволяють з високою точністю й ефективністю розкладати складні звуки на їхні частотні компоненти. Із розвитком недорогих мікроконтролерних платформ, таких як Arduino, Raspberry Pi та STM32, аналіз звуку перестав бути прерогативою лише науково-дослідних лабораторій або великих інженерних проєктів.

Такі пристрої можуть використовуватись для виявлення технічних несправностей за звуковими аномаліями, аналізу стану навколишнього середовища, створення музичних інструментів нового покоління, або навіть для допоміжних засобів у навчанні та дослідженнях у галузі фізики й біології. З огляду на постійне зростання обсягів цифрових даних та потребу в інтелектуальних системах обробки інформації, спектральний аналіз звуку стає ключовим інструментом у міждисциплінарних дослідженнях і технологічних інноваціях. Його важливість дедалі зростає в умовах переходу до Інтернету речей (IoT), де аналіз звуку використовується для реалізації функцій «розумного» середовища, автоматичного реагування на події та підвищення безпеки систем.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ

Почнемо розглядати тему з основоположних аспектів та понять, а саме, що таке сигнал, його загальна характеристика, класифікація та види.

Термін «сигнал» (рисунок 1.1) пішов від латинського signum – знак. Одного усталеного визначення поняття «сигнал» наразі не існує. Найкоротше та одне з найбільш влучних означень дав В. Даль: «Сигнал – це звістка за допомогою знаку». В цьому визначенні відображені основні властивості сигналу: те, що в сигналі міститься певна важлива для дослідника інформація, і те, що сигнал не може існувати сам по собі, а обов'язково повинен бути носій, що переносе енергію сигналу від джерела до адресата. Наразі неможливо передати інформацію не передаючи при цьому енергію, а отже можна сказати, що сигнал – це сукупність повідомлення та його носія.

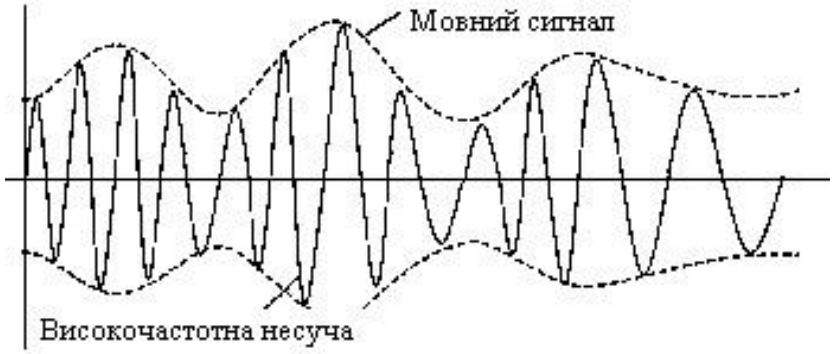

Рисунок 1.1 – Модуляція мовним сигналом

Носієм сигналу є поле: електромагнітне, температурне або поле матеріальних часток. Вимірюючи характеристики такого поля (фізичні величини) ми вимірюємо сигнали. Значення сигналу – це значення фізичної величини, яка вимірюється у часі, просторі чи інших координатах. Те, що інформація передається не безпосередньо, а з використанням знаків,

символів, фізичних величин, що несуть змістовне навантаження, передбачає необхідність обробки, аналізу та інтерпретації тих даних, що будуть в розпорядженні адресата повідомлення.

Сигнал – це фізичний процес, характеристики якого несуть інформацію про певне явище чи стан об’єкта, або передають команди управління та оповіщення. Якщо сигнал спеціально створений для передачі повідомлення, то певний параметр цього процесу змінюється відповідно до тої інформації, яку треба передати. Всі фізичні процеси з точки зору теорії сигналів описуються математичними функціями з тими чи іншими властивостями. Як правило, характеристики об’єктів змінюються з часом або в просторі. Отже, функції, які будуть описувати зміну величини сигналу – функції часу або просторової координати. Для загальності далі в цій книзі будемо мати на увазі, що всі сигнали, про які іде мова – є функціями часу, якщо інше спеціально не зазначене окремо. Властивості, які має сигнал, визначають, які саме математичні функції треба використовувати для того, щоб його представити графічно та описати математично (рисунок 1.2).

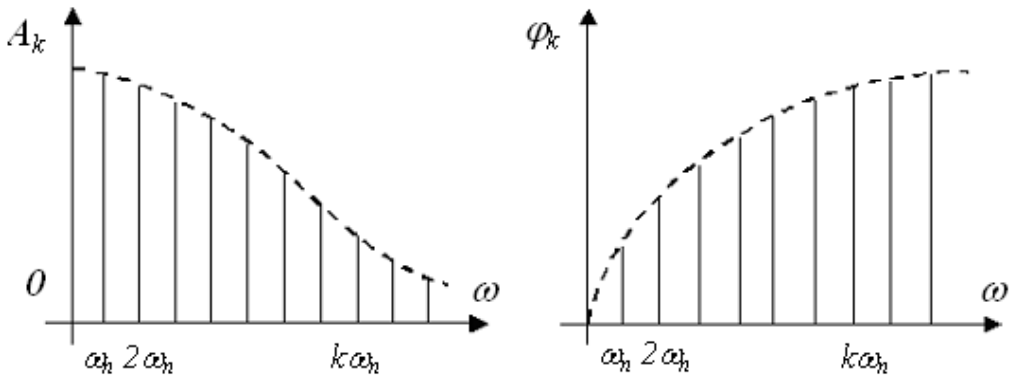

Рисунок 1.2 – Спектральна характеристика сигналу

Так, періодичні неперервні сигнали зручно описувати періодичними функціями, а якщо значення сигналу мають випадковий характер, то його зручно описати математично як випадкову функцію. Якщо сигнал

дискретний, то його описують як числову послідовність. Процедуру описання сигналу за допомогою математичної функції можна розглядати як процедуру побудови математичної моделі сигналу (рисунок 1.3). Математична модель сигналу – це створена або обрана дослідником математична функція чи система функцій, яка відображає істотні властивості сигналу, який досліджується. Дослідження моделі сигналу може до певної міри замінити дослідження реального сигналу та дати нову інформацію про об’єкт, з яким сигнал пов’язаний. Моделюванню сигналів присвячений окремий розділ теорії сигналів. Отже, насправді весь математичний апарат теорії сигналів працює не з реальними сигналами, а з їх математичними моделями – функціями, які описують сигнали.

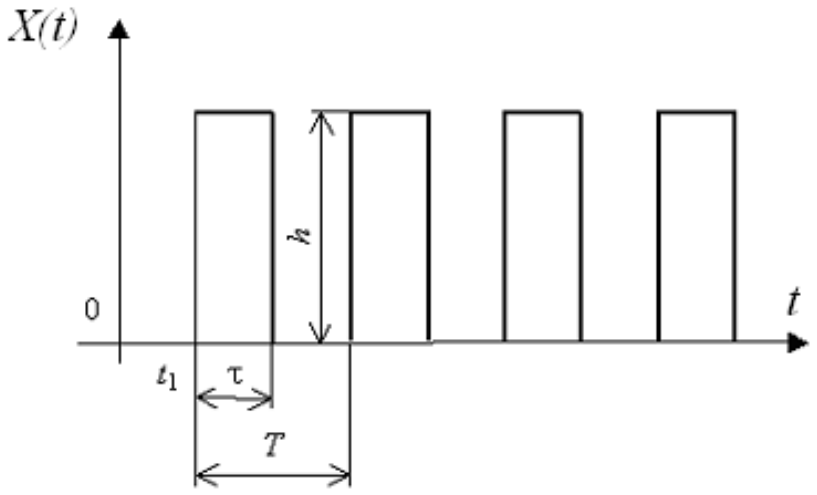

Рисунок 1.3 – Перетворення сигналів

За причиною виникнення або за об’єктом, з яким пов’язаний сигнал, їх поділяють на сигнали природних систем, тобто фізичних та біологічних об’єктів. Прикладом може бути сигнал електроенцефалограми – запис електричних коливань, що супроводжують роботу мозку, або випромінення зірок, що реєструється інфрачервоними телескопами. Інші ж сприймаються як сигнали штучних систем, тобто технічних пристроїв. Наприклад, таким

сигналом є сигнал, зареєстрований антеною стільникового телефону.

Залежно від властивостей функцій, що описують неперервні сигнали, їх можна поділити на такі види, які часто зустрічаються на практиці. Одними з найпоширеніших варіантів сигналів зазначаються такі. Перший – це періодичний сигнал - сигнал, значення якого повторюються через однакові проміжки часу, називається періодичним. Другими є сигнали, що є обмежений за амплітудою - це сигнали, миттєві значення яких обмежені за амплітудою певним дійсним додатним числом. Наступний включає із себе сигнали з скінченною енергією - великий клас сигналів, які називають сигналами зі скінченною енергією. Всі сигнали, які нас оточують є сигналами зі скінченною енергією. Після них йдуть сигнали з обмеженою тривалістю - це сигнали, значення яких дорівнюють нулю за межами деякого інтервалу аргументу (часу). Такі сигнали часто називають фінітними (скінченними) сигналами. Вони існують лише протягом певного проміжку часу. Поза цим проміжком вони або дорівнюють нулю, або невизначені. Наостанок ми маємо сигнали з обмеженим спектром - це сигнали, спектр за Фурьє яких сконцентрований лише на певному проміжку частот, а складових на інших частотах в спектрі сигналу немає.

З поняття сигнал хочеться перейти до пов’язаного із цієї темою аргументом, а саме – звук. Що для нас, як для людей є звук, що він із себе представляє, його визначення та характеристики.

Звук створюють механічні коливання різних елементів музичних інструментів, голосового апарату людини тощо, а поширюється він внаслідок передавання енергії механічних коливань частинок середовища як звукова хвиля. Звук же, сам по собі, має подвійну природу:

- з одного боку, це об'єктивний процес передавання енергії механічних коливань частинок в пружному середовищі (повітрі, рідині, твердому тілі);
- з іншого боку, це тільки ті види механічних коливань середовища, які сприймає слухова система людини.

Таким чином, звук - це особливий вид механічних коливань, здатних

спричинювати слухові відчуття. Звук - суб'єктивна характеристика акустичних коливань, що відображає здатність слухового апарату людини розпізнавати частоту і інтенсивність акустичних коливань певного частотного діапазону. Акустика - наука про звук, є одним з напрямків фізики. Серед основних проблем, що входять в сферу сучасної акустики, виділяють такі: - виникнення звуку, що вимагає дослідження фізичної природи звуку, а також методів і засобів його створення. Ці питання є також об’єктом досліджень в акустиці музичних інструментів, акустиці мови, електроакустиці; - передавання звуку від джерела до слухача - це завдання архітектурної акустики, електроакустики тощо; - сприйняття звуку слуховою системою і зв'язок слухових відчуттів з об'єктивними параметрами звуку – це сфера досліджень психоакустики. Приблизно 25% інформації про навколишній світ людина отримує від слухових аналізаторів, 60% - від зорових і 15% - від інших.

Слух людини сприймає тільки обмежений клас механічних коливань середовища, що є в певних межах за рівнем гучності (зміна рівня звукового тиску від 0 дБ до 120 дБ) і за висотою тону (зміна частоти від 20 Гц до 20000 Гц). В цьому відношенні людина дуже поступається іншим біологічним суб'єктам (наприклад, діапазон чутних частот дельфіна сягає 200 кГц тощо) Всі навколишні звуки можна умовно розподілити за різними ознаками, наприклад: - за способом створення - на натуральні та штучні (природний шум, мова, музика, біосигнали, електронні сигнали); - за інформаційною ознакою - на звуки для передавання семантичної 19 (змістовної) і емоційної інформації (мова, спів і музика); для передавання інформації щодо навколишнього середовища (шум, сигнальні звуки тощо); - за фізичними параметрами, такими як: частотний діапазон (інфразвук, ультразвук, гіперзвук тощо); ступінь передбачуваності (випадкові сигнали, наприклад білий шум; детерміновані сигнали; квазівипадкові сигнали, в тому числі музика і мова); часові параметри (періодичні, неперіодичні, імпульсні) тощо. Всі ці види сигналів є об’єктом досліджень різних напрямків в акустиці як

науки. Напрямки ж акустики існує дуже багато. Насамперед існує загальна (фізична) акустика – це теорія випромінювання і поширення звуку в різних середовищах, теорія дифракції, інтерференції і розсіювання звукових хвиль. Лінійні і енергетичні характеристики поширення звуку. Архітектурна акустика - закони поширення звуку в закритих (напівзакритих, відкритих) приміщеннях, методи управління структурою поля в приміщенні тощо. Психоакустика - основні закони слухового сприйняття, визначення зв'язку об'єктивних і суб'єктивних параметрів звуку, визначення законів розшифрування «звукового образу». Музична акустика - закономірності створення, поширення і сприйняття музичних звуків, точніше - звуків, які використовують в музиці. Електроакустика - теорія і практика конструювання випромінювачів і приймачів, що перетворюють електричну енергію в акустичну і навпаки, а також всіх елементів сучасних звукових трактів запису, передавання та відтворення звуку. Акустика мови - теорія і синтез мови, виділення мови на тлі шумів, автоматичне розпізнавання мови тощо. Цифрова акустика – галузь, яку активно розвивають в останні роки, поступово виділяють в самостійний напрям у зв'язку зі створенням нового покоління мікропроцесорної (аудіопроцесорної) і комп'ютерної техніки.

Звукова хвиля — це процес перенесення енергії механічних коливань у пружному середовищі (наприклад, у повітрі, воді, металі тощо), який супроводжується періодичним стисканням і розрідженням частинок цього середовища. Звукова хвиля виникає внаслідок механічного збурення — наприклад, вібрації тіла, яке спричиняє коливання частинок навколо положення рівноваги. Ці коливання передаються від частинки до частинки, утворюючи хвилеподібне розповсюдження енергії.

Звук не може поширюватися у вакуумі, оскільки для його передачі необхідне середовище, що здатне до пружних деформацій. У більшості випадків звукові хвилі в повітрі мають поздовжній характер, тобто частинки середовища коливаються вздовж напряму поширення хвилі. У твердих тілах можливе існування як поздовжніх, так і поперечних хвиль.

Звукові хвилі (рисунок 1.4) характеризуються кількома фізичними параметрами, серед яких основними є:

- частота (f) — кількість коливань за секунду, вимірюється в герцах (Гц). Визначає висоту звуку;

- амплітуда (A) — максимальне відхилення частинки від положення рівноваги. Визначає гучність звуку;

- довжина хвилі (λ) — відстань між двома послідовними точками середовища, які перебувають у однаковій фазі коливань;

- швидкість поширення звуку (v) — залежить від властивостей середовища (густини, пружності). Наприклад, у повітрі при температурі 20°C ця швидкість приблизно дорівнює 343 м/с.

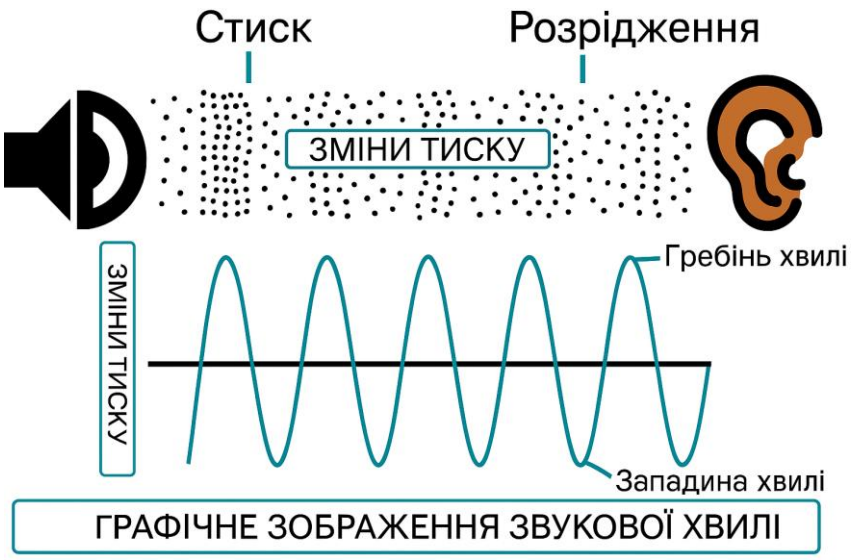

Рисунок 1.4 – Звукові хвилі

Людське вухо сприймає звуки в діапазоні частот приблизно від 20 Гц до 20 кГц. Звуки, що мають частоти нижчі за 20 Гц, називають інфразвуком, а ті, що перевищують 20 кГц — ультразвуком. Обидва ці типи хвиль мають широке практичне застосування: інфразвук — у сейсмології, ультразвук — у медицині, техніці, гідролокації тощо.

Таким чином, звукова хвиля — це не лише форма механічного

коливального руху, але й важливий фізичний процес, який має численні практичні й наукові застосування.

Виходячи з цього, розглянемо теорію з приводу простих та складних звуків. Бо існуючі в природі звуки збуджені або простими гармонічними (наприклад, синусоїдними) коливаннями, або складними, що складено з багатьох (іноді – багаточисленних), але одночасно здійснюваних гармонічних коливань. Прості гармонічні коливання в природних умовах зустрічають вкрай рідко. Прості звуки - це синусоїдні коливання (чисті тони), що одержують з генератора звукових коливань. Прості звуки характеризують частотою і амплітудою. Частота простого звуку або основного тону складного звуку спричинює слухове відчуття, яке називають «висотою» тону. Зміна частоти коливань від 20 Гц до 20 кГц викликає сприйняття тону, що поступово змінюється від найнижчого (басового) до самого високого. Ступенем зміни висоти тону є октава. Октаві відповідає зміна частоти у 2 рази. В процесі коливання будь-якого тіла відбувається перехід одного виду енергії в інший вид, наприклад, кінетична енергія руху тіла у потенціальну енергію спокою. При цьому, частину енергії у реальних умовах витрачено на подолання тертя о повітря, тертя на опорах тощо. В результаті цього амплітуда коливань зменшується, а з часом коливання зупиняються і амплітуда дорівнює нулю. Має місце загасання коливань. Чим більше коефіцієнт загасання, тим швидше згасають коливання (тим швидше зменшується їх амплітуда).

Отже, реальні випромінювачі, наприклад голосові зв'язки, струни рояля, скрипки коливаються одночасно не одним, а кількома способами, випромінюючи при цьому не тільки основне коливання, але і ряд інших, так званих вищих гармонік, або обертонів. Амплітуди обертонів завжди менше амплітуди основного коливання, а їх частоти в ціле число разів більше основної частоти. Внаслідок цього повний частотний діапазон спектра кожного музичного інструменту завжди ширше висотного діапазону основного ладу цього ж інструмента. Складні музичні звуки створюють у

результаті змішування простих гармонічних коливань – гармонік. Спектр складного музичного звуку обмежений числом складових його гармонік. Тембр визначають як числом гармонік в спектрі, так і співвідношенням їх амплітуд.

Суб'єктивне відчуття звуку - чуттєва копія фізичного явища - може бути розкладено на ряд складових, кожна з яких пов'язана з одним з параметрів роздратування. Ці складові і прийнято називати параметрами відчуття (таблиця 1.1). До їх числа відносять: поріг чутності, поріг больового відчуття, гучність, тон, тембр тощо.

Таблиця 1.1 – Параметри подразнення і параметри відчуття

Параметри подразнення	Параметри відчуття
Частота	Висота тону
Частотний діапазон, АЧХ	Тембр («сухий, «соковитий», різкий, натуральний)
Нерівномірність АЧХ	Зміна тембру
Амплітуда, рівень сигналу та його інтенсивність	Гучність, рівень гучності
Нестабільність рівнів	Зміна гучності (коливання гучності)
Динамічний діапазон	Відчуття самих тихих і найгучніших звуків
Коефіцієнт нелінійних спотворень	Помітність спотворення
Зважений шум	Звукові завади

Отже, виходячи з усіх цих описів ми можемо сказати остаточно, що робота із звуковими сигналами потребує, в першу чергу, перетворення акустичних сигналів в електричні мікрофонами. Сигналами, що застосовують в звукотехніці є акустичні, електричні, звукові сигнали. Тому важливо зазначити визначення цих термінів - акустичний, електричний, звуковий сигнал. Акустичний в класичному визначенні – чутний, тобто це сигнал, який

людина сприймає слуховим органом. Акустичний сигнал формується безпосередньо в повітряному просторі як зміна статичного атмосферного тиску і визначається звуковим тиском в паскалях (Па) або рівнем звукового тиску у у відносних одиницях децибелах (дБ). Крім тиску акустичний сигнал характеризують інтенсивністю, але інтенсивність як сила звуку є енергетичним параметром і визначає потужність саме джерела сигналу. За фізіологічного сприйняття акустичного сигналу людина сприймає тиск і не коректно стосовно сприйняття людини зазначати інтенсивність звуку. Мікрофон теж сприймає тиск, а не інтенсивність. Акустичний сигнал як фізичне явище не може підлягати будь-якому обробленню, окрім, наприклад, застосування рупора для концентрації енергії. 16 Зменшити гучність акустичного сигналу в момент виникнення або «відключити» його неможливо, змінити тембр не можна. Звуковий сигнал – сигнал, що відповідає параметрам сприйняття його людиною, а саме, коливання з частотами від 20 Гц до 20000 Гц та звуковий тиск, який змінює статичний атмосферний тиск в межах від 20 мкПа (2·10-5 Па), що відповідає рівню звукового тиску 0 дБ, до приблизно 63 Па, що відповідає рівню 130 дБ. Якщо порівняти сприйняття акустичних сигналів для окремих тварин, то параметри саме звукового (чутного ними) сигналу будуть інші, наприклад, собаки сприймають звуки в діапазоні, приблизно від 100 Гц до 60 кГц, дельфіни – від 60 Гц до 200 кГц. Електричний сигнал – сигнал, сформований на виході мікрофона після його перетворення, за своєю формою повторює форму акустичного сигналу, що діє на мікрофон. Електричний сигнал на виході мікрофона характеризують напругою в мілівольтах (мВ) або відносним рівнем напруги (дБ). Електричний сигнал може бути оброблено за частотою, рівнем, формою, збережений на носії, переданий каналами зв’язку тощо. Електричний сигнал може бути перетворено в акустичний з відповідними акустичними параметрами гучномовцями. Змінюючи електричні параметри звукового сигналу, а саме, напругу, силу струму, потужність, а також частотну характеристику сигналу можна змінювати отримані акустичні

параметри – гучність, тембр, напрямок поширення.

Зважаючи на викладене вище, можемо зробити висновок, що звуковий сигнал — це складне фізичне й інформаційне явище, яке потребує багаторівневого аналізу, що охоплює як фізичні принципи поширення хвиль у середовищі, так і методи математичного моделювання, цифрової обробки та інтерпретації сигналів. Сучасний рівень розвитку електроніки та обчислювальної техніки дозволяє не лише фіксувати та зберігати звукову інформацію, але й оперативно обробляти її в режимі реального часу, здійснюючи спектральний аналіз, виявлення характерних ознак, автоматичне розпізнавання джерел звуку або стану об'єкта, з яким цей звук пов'язаний.

Окрему увагу заслуговує перехід від аналогової до цифрової форми представлення сигналів, що стало основою цифрової акустики та обробки звуку. Саме цифрові методи, такі як дискретне перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз, фільтрація, спектральна сегментація тощо, відкривають широкі можливості для побудови інтелектуальних систем обробки звуку — від простих спектроаналізаторів до складних нейромережевих моделей розпізнавання мови або звукових аномалій.

Такі системи сьогодні можна реалізувати навіть на базі недорогих та енергоефективних мікроконтролерних платформ, наприклад, Arduino, у поєднанні з сенсорними пристроями та OLED-дисплеями. Завдяки цьому відкривається доступ до створення компактних портативних пристроїв, здатних виконувати складні обчислення — аналізувати звуковий спектр, візуалізувати гармонійні складові, реагувати на зміни навколишнього звукового середовища тощо.

Аналіз звуку за допомогою Arduino — це поєднання апаратних засобів та програмних технік, що відкривають двері у світ цифрової обробки сигналів. Використання FFT для перетворення часового звукового сигналу у спектральне представлення, разом із візуалізацією на OLED-дисплеї, дає змогу створити компактний, зрозумілий та інтерактивний інструмент для аудіоаналізу. Це дозволяє не лише побачити, але й відчути структуру звуку,

відкриваючи нові горизонти для експериментів і творчості. [1]

Таким чином, сучасні підходи до аналізу звукових сигналів поєднують в собі знання фізики, математики, електроніки та інформатики, формуючи міждисциплінарну базу для подальших досліджень, винаходів і практичних розробок у галузі цифрової акустики.

Зважаючи на стрімкий розвиток технологій та зростаючий попит на системи, здатні «чути» і реагувати на акустичні зміни, спектральний аналіз звуку знаходить своє місце не лише в академічних дослідженнях, а й у численних прикладних сферах: автоматизованих системах контролю стану обладнання (через виявлення аномальних шумів), екологічному моніторингу (виявлення джерел шумового забруднення), побутовій техніці, а також у сфері безпеки (виявлення скла, вибухів, пострілів тощо).

1.1 Звук як подія і його потік

Звук можна розглядати як подію, що виникає у певний момент часу в результаті фізичного процесу — коливання повітря, вібрації об’єкта або електричного імпульсу. Кожен звук, що сприймається або фіксується, є дискретною подією, яка має свої характеристики: інтенсивність, частоту, тривалість, напрямок поширення тощо.

Характеристики звукових подій, а саме однорідність або неоднорідність. Події звуку можуть бути однорідними (наприклад, серія однакових імпульсів у музичному ритмі) або неоднорідними (різні типи звуків — голоси, шум, сигнали). Випадковість, бо хоча звукові події і можуть виникати випадково, у багатьох випадках вони мають закономірний характер (музика, мовлення, систематичні сигнали).

Потік звукових подій — це послідовність звукових подій, що виникають одна за одною у часі. Цей потік може бути неперервним, наприклад, шум моря, постійний гул вулиці. Дискретним, наприклад, серія клацань, удари барабану, окремі слова у мові.

Прикладом же потоку звукових подій може слугувати речення, що вимовляється, складається з послідовності звуків (фонем), які сприймаються як потік звукових подій. Музичний твір утворений послідовністю нот, кожна з яких є звуковою подією. Потік шумів у промисловому середовищі може служити індикатором роботи або несправностей обладнання.

У техніці — моніторинг потоку звуків допомагає виявляти аномалії, які сигналізують про неполадки. У музикознавстві — вивчення потоку звуків допомагає аналізувати структуру композиції та емоційний зміст.

Відмінність звукових подій від випадкових подій Звукові події, що формують потік, зазвичай не є випадковими у класичному розумінні ймовірності — вони мають причинно-наслідкові зв’язки і закономірності, хоча можуть включати випадкові елементи.

Датчик звуку видає аналоговий сигнал (рисунок 1.5) — безперервну змінну напругу, що відображає зміну звуку в часі. Мікроконтролер не може безпосередньо працювати з таким сигналом, адже він обробляє цифрові дані. Для сприйняття аналогового звуку мікроконтролер використовує вбудований аналогово-цифровий перетворювач.

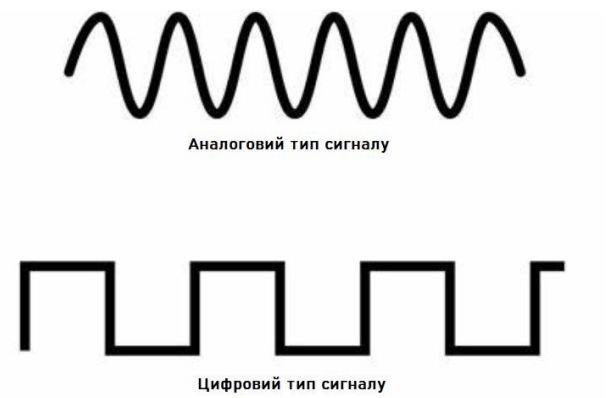

Рисунок 1.5 – Типи сигналів

АЦП перетворює аналогову напругу у цифрове число, що відповідає амплітуді сигналу у певний момент часу. Ці цифрові значення можна обробляти програмно для аналізу звуку: визначати рівень гучності, частоту,

виявляти певні звукові патерни. Цифровий сигнал і мікроконтролер, бо деякі датчики звуку мають вбудований модуль, який перетворює аналоговий сигнал у цифровий прямо в датчику. Вони виводять цифровий сигнал — наприклад, високий або низький рівень напруги, що відповідає наявності або відсутності звуку (пороговий детектор). Мікроконтролер приймає цей цифровий сигнал як логічний 0 або 1 на вході. Такий сигнал простий у обробці — можна швидко визначати факт появи звуку, шуму або іншого звукового імпульсу. Однак цифровий датчик зазвичай не дає детальної інформації про амплітуду чи частоту звуку.

Потік подій — це послідовність однорідних подій, що з’являються одна за одною в випадкові моменти часу. Приклади: потік дзвінків на телефонній станції, потік автомобілів, які під’їжджають до заправної станції, потік захворювань на грип у зимовий сезон, потік забитих шайб під час гри в хокей, потік заявок на ремонт, що надходять до ремонтної організації, потік відмов (збоїв) ЕОМ під час її роботи, потік електронів, які вилітають з катода електронної лампи, потік електричних імпульсів, що надходять від мозку до м’яза для його збудження, тощо. Події, що формують потік, у загальному випадку можуть бути і неоднорідними, наприклад, якщо в потоці автомобілів, що прибувають на заправку, розрізняти легкові та вантажні. Зазначимо, що термін «подія» у понятті потік подій має зовсім інше значення, ніж широко вживане в теорії ймовірностей поняття випадкова подія, під якою розуміють «будь-який факт, який у досліді з випадковим результатом може статися або не статися». Про події, що формують потік, так сказати не можна.

З першого погляду найпростішим видається потік подій, у якому інтервали між подіями строго однакові і дорівнюють певній невипадковій величині. Такий потік подій називається регулярним. Прикладами регулярних (точніше, практично регулярних) потоків є потік змін хвилинної цифри на вокзальних електронних годинах, потік змін станів ЕОМ, визначуваний тактом її роботи тощо. Регулярний потік подій досить рідко

зустрічається на практиці; він становить певний інтерес як граничний випадок для інших потоків. Однак, незважаючи на свою видиму простоту, регулярний потік не має переваг при математичному аналізі, оскільки значно поступається за простотою проведення розрахунків іншим типам потоків. Потік подій називається ординарним, якщо події в ньому з'являються поодинці, а не «пачками» по 2, 3 і т. д.

Випадковий потік подій (Стохастичний потік) на відміну від регулярного, у випадковому потоці інтервали між подіями є випадковими величинами. Цей тип потоку широко застосовується для моделювання подій, що відбуваються у випадкові моменти часу, наприклад, дзвінки в телефонну мережу, появи клієнтів у магазині, відмови обладнання тощо.

У цьому випадку події можуть виникати не поодинці, а групами. Такий потік не є ординарним. Наприклад, у телекомунікаційних мережах можливі одночасні надходження декількох пакетів даних або у виробничих процесах – одночасні поломки кількох елементів.

Потік з неперервним часом та дискретними подіями, це потік, у якому час подій є неперервною величиною, але події самі дискретні і їх можна порахувати. Зазвичай, це модель для випадкових подій, які відбуваються у реальному часі.

Потік подій з пам'яттю іноді інтервали між подіями залежать від попередніх подій або минулого стану системи. Такий потік називають процесом з пам'яттю, або марківським процесом, якщо майбутній стан залежить лише від поточного. У таких потоках події не є незалежними.

Гомогенний та негомогенний потік відрізняються такими параметрами та характеристиками:

- гомогенний потік — інтенсивність появи подій залишається сталою в часі (наприклад, пуассонівський процес з постійною інтенсивністю);
- негомогенний потік — інтенсивність змінюється з часом (наприклад, у періоди пікового навантаження події відбуваються частіше).

2 АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ

За для успішної реалізації проєкту і подальшого його розвитку за основу було взято такий мікроконтролер, а саме Arduino з намалюванням структурної схеми проєкту (рисунок 2.1).

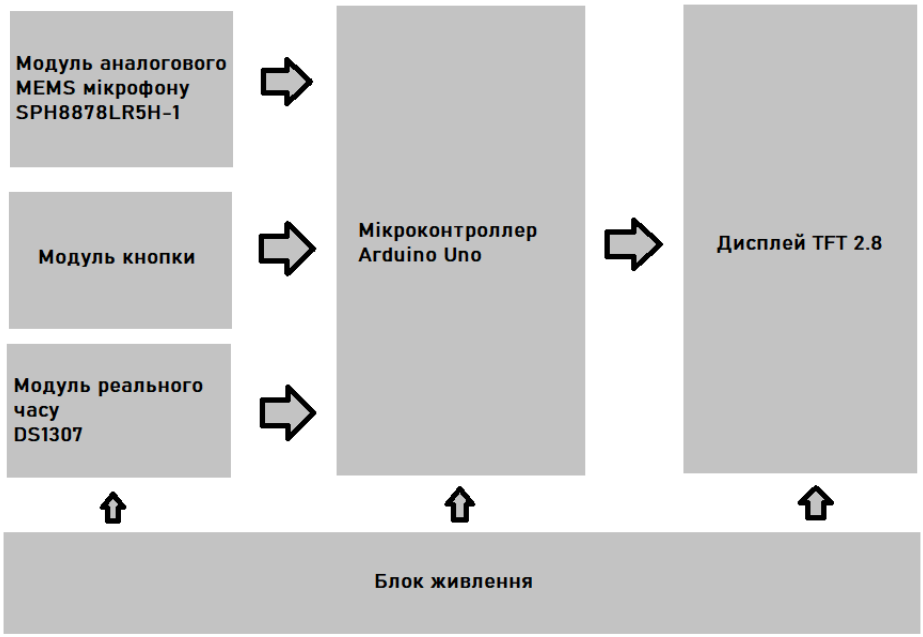

Рисунок 2.1 – Структурна схема проєкту

Принцип роботи пристрою полягає в наступному: звук сприймається мікрофонним модулем, перетворюється на електричний сигнал і подається на вхід АЦП мікроконтролера Arduino, де оцифровується і програмно обробляється. Оброблені дані виводяться на індикатор у реальному часі, що дозволяє візуалізувати параметри звуку. Завдяки простоті використання платформи Arduino пристрій має низку переваг: доступність компонентів, гнучкість програмування, невелику вартість та можливість модифікації для

додавання нових функцій. Живлення конструкції здійснюється від USB або стабілізованого джерела напруги 5 В.

Пристрій може використовуватися для аудіомоніторингу рівня шуму, у навчальних лабораторіях для демонстрації принципів аналізу звуку, у домашніх системах сигналізації або системах автоматичного контролю гучності. Завдяки використанню мікроконтролера Arduino Uno конструкція є функціонально завершеною і не потребує складного налаштування.

Цифровий аналіз звукового спектра базується на дискретизації аналогового сигналу, обробці та подальшому математичному аналізі. Основним етапом цього процесу є перетворення звукової хвилі в набір числових значень за допомогою аналого-цифрового перетворювача. [2]

Для подальшої обробки отриманих цифрових даних застосовуються різні алгоритми спектрального аналізу. Одним із найбільш поширених методів є швидке перетворення Фур'є (рисунок 2.2), яке дозволяє представити сигнал у частотній області.

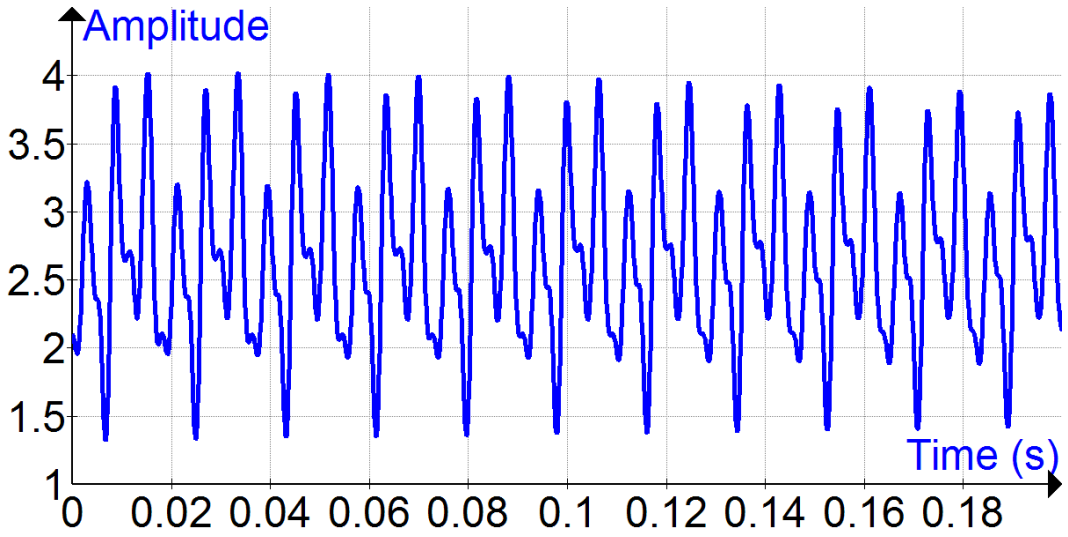

Рисунок 2.2 - Аналіз Фур’є

Цей метод широко використовується завдяки своїй ефективності та відносно низьким обчислювальним витратам. Проте для підвищення точності аналізу часто застосовуються віконні функції, що допомагають зменшити

ефект "витоку спектра" та покращити якість частотного представлення сигналу. До найбільш популярних вікон належать вікна Ганна, Хеммінга, Блекмана та Кайзера.

Окрім FFT, існують інші методи спектрального аналізу, зокрема вейвлет-перетворення, яке дозволяє досліджувати спектральні характеристики сигналу з високою роздільною здатністю як у часовій, так і в частотній області. Такий підхід є особливо корисним для аналізу нестаціонарних сигналів, де частотні компоненти змінюються з часом.

Перед початком розробки була обрана система симуляції для повного занурення у проєкт. Ось декілька з симуляторів, які були першочергово протестовані та могли бути обрані за для реалізації. [3]

Першим з симуляторів є Tinkercad Circuits (рисунок 2.3) — це безкоштовна веб-платформа від Autodesk, яка надає зручне та інтуїтивно зрозуміле середовище для створення, моделювання та тестування електронних схем із використанням Arduino.

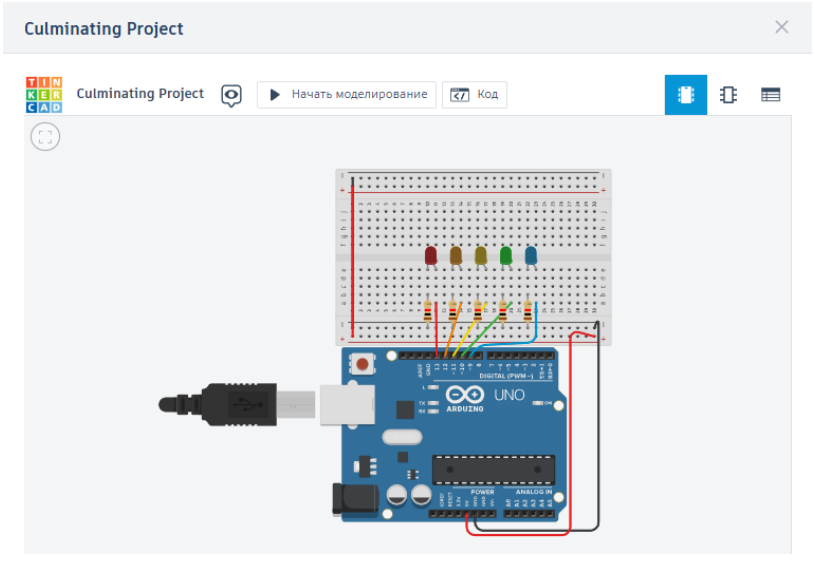

Рисунок 2.3 - Система симуляції Tinkercad Circuits

Платформа орієнтована як на початківців, так і на користувачів із базовими знаннями електроніки, пропонуючи простий у використанні інтерфейс з можливістю перетягування компонентів, підключення їх між

собою та написання коду. Однією з ключових переваг Tinkercad Circuits є підтримка двох режимів програмування: текстового (на основі мови Arduino C/C++) та блокового. Це дозволяє поступово навчатися програмуванню, починаючи з простих блоків, а згодом переходити до повноцінного коду.

Платформа також надає можливість реального часу симуляції, що дозволяє відразу бачити результат роботи вашого коду та електронної схеми без необхідності фізичного підключення компонентів.

Другим симулятором є Proteus Design Suite (рисунок 2.4) — це потужне і професійне програмне забезпечення для моделювання та симуляції електронних схем, що широко використовується інженерами, розробниками та викладачами у галузі електроніки та вбудованих систем.

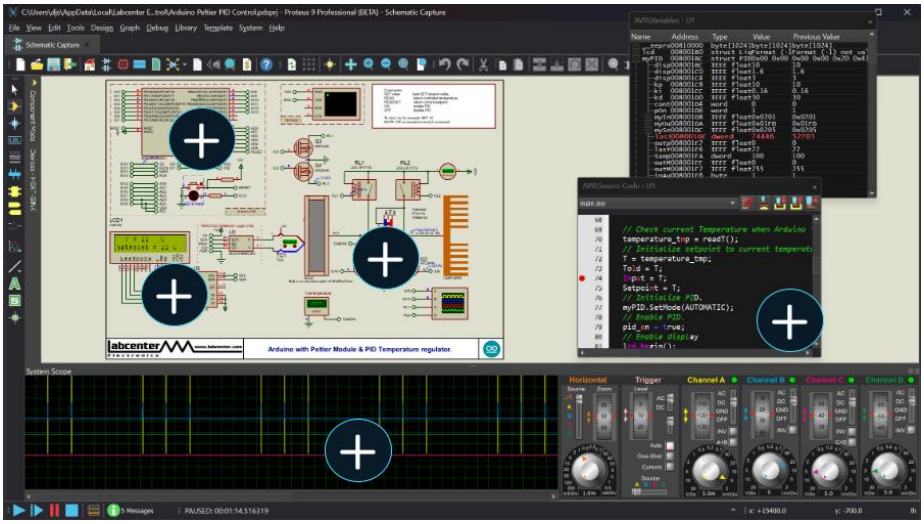

Рисунок 2.4 - Система симуляції Proteus Design Suite

Особливістю Proteus є можливість одночасної симуляції як апаратної частини — електронних компонентів та схем, так і програмного забезпечення, яке виконується на мікроконтролерах, зокрема на Arduino. Програма підтримує моделювання різноманітних мікроконтролерів, що дозволяє проводити комплексне тестування складних проєктів без фізичного прототипу. Proteus забезпечує високоточну симуляцію електронних схем з урахуванням реальних електричних параметрів компонентів, що допомагає

ідентифікувати потенційні проблеми ще до початку фізичного монтажу. Інтерфейс програми багатофункціональний і має безліч інструментів для створення схем, трасування друкованих плат, а також для програмування та налагодження мікроконтролерів. Однак, слід врахувати, що повний доступ до усіх можливостей Proteus потребує придбання ліцензії, оскільки програмне забезпечення є комерційним.

Третім симулятором став SimulIDE (рисунок 2.5). SimulIDE — це простий у використанні, але досить функціональний симулятор електронних схем і мікроконтролерів, зокрема Arduino, який працює у режимі реального часу.

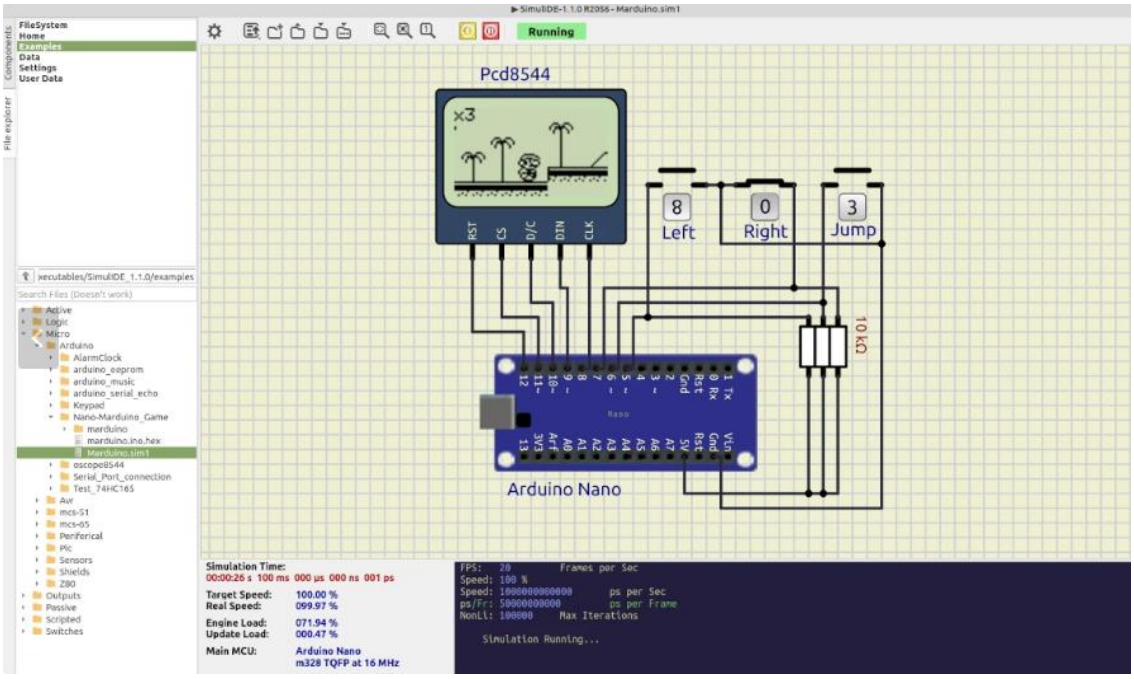

Рисунок 2.5 - Система симуляції SimulIDE

Його основна перевага — легкість освоєння та швидкість роботи, що робить його ідеальним інструментом для студентів, новачків і тих, хто хоче швидко протестувати прості ідеї без необхідності складної настройки. Програма дозволяє моделювати базові електронні компоненти — резистори, конденсатори, світлодіоди, кнопки, датчики — а також підтримує

завантаження та налагодження Arduino-коду прямо в середовищі симулятора. Це створює зручні умови для навчання основ програмування мікроконтролерів та електроніки без необхідності фізичного підключення апаратури. SimulIDE має простий інтерфейс з можливістю швидкого створення схем за допомогою перетягування компонентів, підключення проводів і запуску симуляції одним кліком. Під час роботи можна в режимі реального часу спостерігати за станом вхідних та вихідних сигналів, що допомагає краще розуміти логіку роботи схеми та алгоритмів.

Наступним симулятором став Fritzing (рисунок 2.6). Fritzing — це комплексний інструмент для проєктування електронних схем, створення друкованих плат (PCB) та документування електронних проєктів.

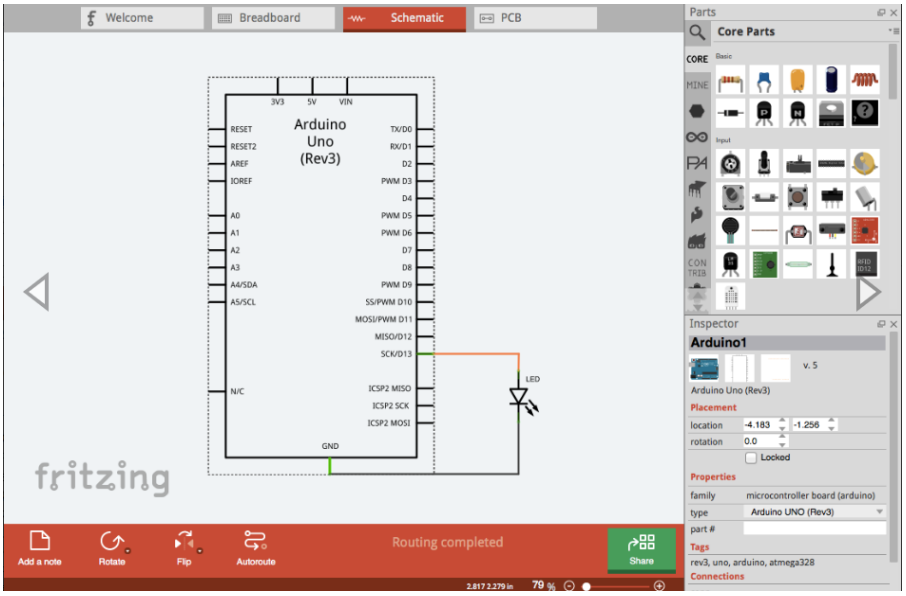

Рисунок 2.6 - Система симуляції Fritzing

Він особливо популярний серед ентузіастів та освітян завдяки зручному візуальному інтерфейсу, що дозволяє легко створювати схеми у вигляді макетних плат (breadboard view), традиційних схем (schematic view) та готових до виготовлення друкованих плат (PCB view). Однією з головних переваг Fritzing є його орієнтація на практичне застосування: користувачі можуть швидко переходити від прототипу на макетній платі до готової схеми

для виготовлення плати. Хоча Fritzing не є повноцінним симулятором, він надає базові можливості для перевірки логіки з'єднань та допомагає уникнути типових помилок при розробці схем. Завдяки цьому інструменту можна чітко задокументувати всі етапи проєкту — від підключення компонентів до програмної частини. Fritzing підтримує великий набір стандартних компонентів, а також дозволяє додавати власні модулі та мікроконтролери, зокрема Arduino.

Але за для реалізації ідеально підійшла система Wokwi, яка дозволяє симулювати великий вибір мікроконтролерів, таких як: Arduino, ESP, STM, Pi Pico і т.д (рисунок 2.7).

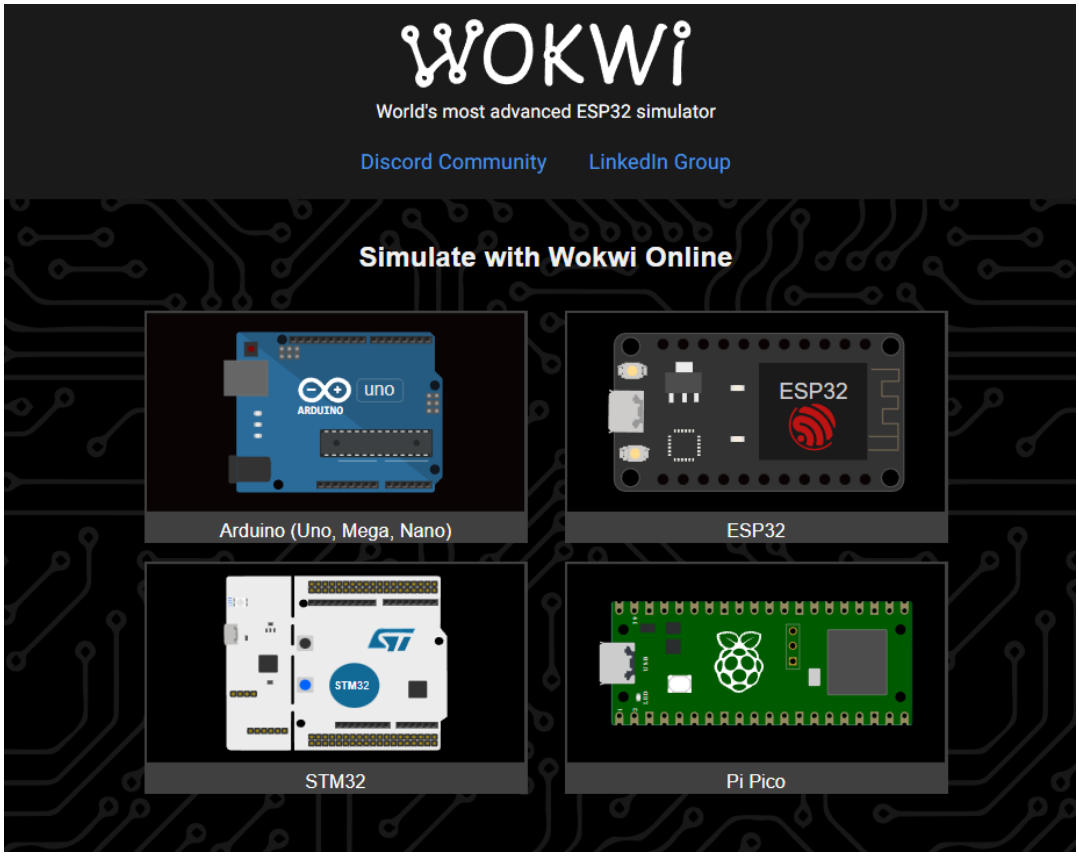

Рисунок 2.7 - Система симуляції Wokwi

Після обрання необхідного мікроконтролеру в нашому випадку це Arduino Uno, треба було реалізувати симуляцію мікрофону на онлайн системі, бо у житті можна було б використовувати мікрофони, такі як: KY-

037, MAX9814, MAX4466. Але симуляція не дозволяє використовувати безпосередньо такі сенсори (датчики), тому треба реалізувати іншу (обхідну) систему, для того щоб виконавча програма, так само як і мікроконтролер могли виконувати свої необхідні функції у повному обсязі без обмежень.

Перш за все було реалізовано таку тестову симуляції за для перевірки основного зобов'язання – використання мікрофону, як зовнішнього приймача сигналу і його обробки. Таким чином було розроблено таку початкову симуляцію (рисунок 2.8).

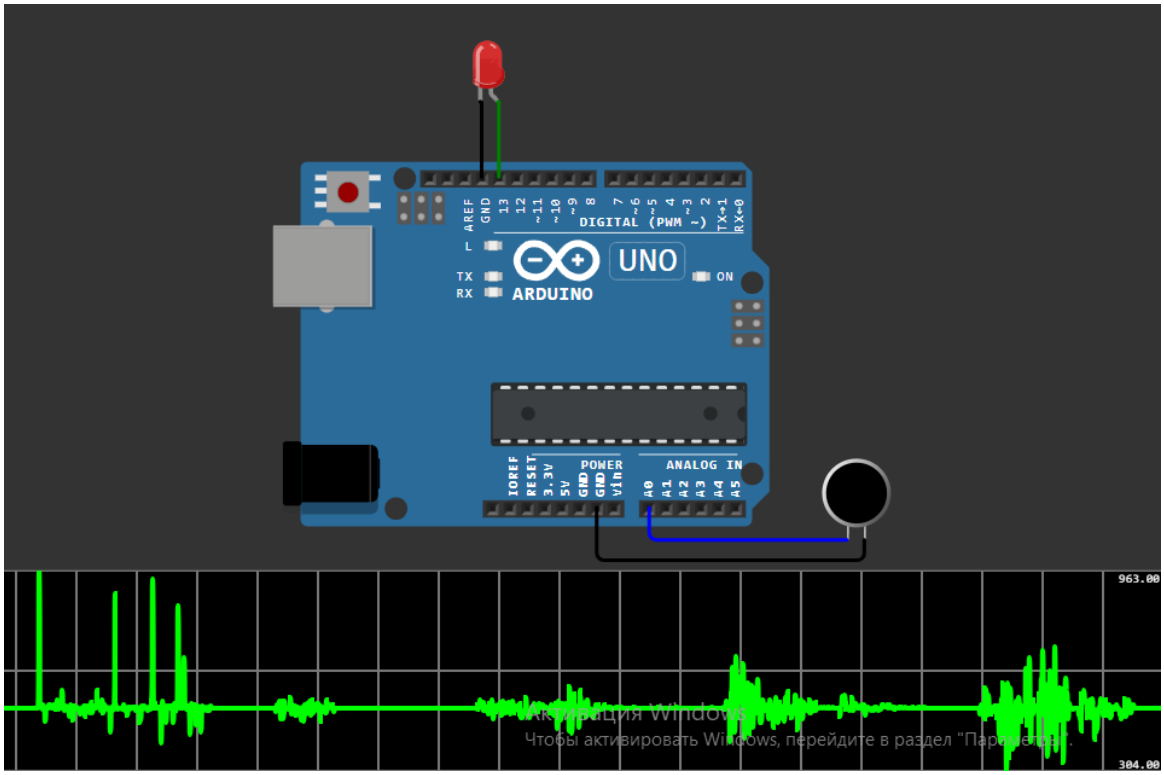

Рисунок 2.8 - Симуляція перевірки мікрофону

На зображенні – симуляція у Wokwi, яка демонструє роботу з мікрофонним модулем та плати Arduino Uno. У даній симуляції використовуються такі компоненти:

- мікроконтролер Arduino Uno – основне керування всією схемою;
- аналоговий мікрофонний модуль – модуль, підключений для аналогового входу A0, що зчитує звук з навколишнього середовища;

- світлодіод – вмикається під час виявлення звуку з навколишнього середовища.

Тепер перейдемо до безпосередньо реалізованого проєкту, який виконує кінцеву мету і повністю відповідає вимогам, поставленим щодо його реалізації як пристрою з можливостями аналізу та характеристики звуку, виявленого у навколишньому середовищі.

Розроблений пристрій — це портативна система моніторингу, здатна у реальному часі виявляти, аналізувати та відображати основні параметри звуку, такі як амплітуда, гучність (у децибелах), частота та тип звукового сигналу (наприклад, голос, музика чи машинний шум). Завдяки використанню мікроконтролера, аналогового аудіовходу та кольорового TFT-дисплея, пристрій забезпечує наочне та зрозуміле відображення отриманих результатів для користувача.

Окремо варто зазначити реалізацію графічного інтерфейсу: дані оновлюються зручною частотою, а також присутня візуалізація звукової хвилі у вигляді синусоїди. Інтерфейс також включає реальний годинник (RTC), який синхронізується при запуску системи, що дозволяє точно фіксувати час кожного аналізованого звукового сигналу. Завдяки вбудованій кнопці паузи користувач має змогу зупинити обробку для перегляду результатів без перезапуску пристрою.

Додатково реалізовано вивід статусу роботи системи — активний аналіз або пауза. Передбачено гнучкі налаштування частоти дискретизації та тривалості зчитування сигналу.

Індикація системних повідомлень та помилок виконується через окремий інформаційний блок, що підвищує зручність моніторингу та діагностики. Інтерфейс розроблено з урахуванням принципів ергономіки та мінімалістичного дизайну, що забезпечує інтуїтивну взаємодію навіть для користувачів без спеціальної технічної підготовки.

Перейдемо для більш глибинного огляду. Під час запуску нас зустрічає екран, вказуючий на назву проєкту та його розробника (рисунок 2.9).

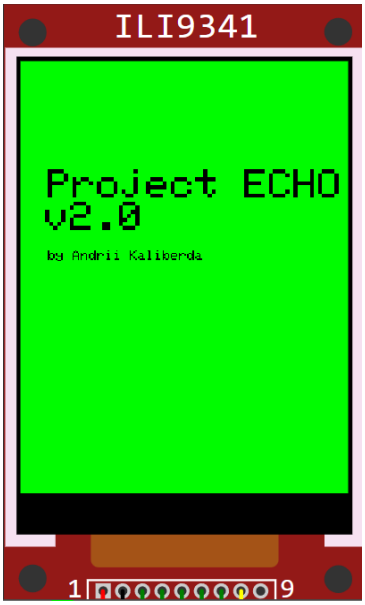

Рисунок 2.9 - Екран вітання

Переходячи до наступного етапу, ми бачимо основне меню програми та його характеристики-параметри (рисунок 2.10).

Рисунок 2.10 - Екран можливостей

На основному екрані ми бачимо такі характерні можливості проєкту, а

саме:

- отримання часу у реальному моменті виконання програми;
- параметр амплітуди звуку;
- гучність у децибелах;
- частота отриманого звукового сигналу;
- стрічка статусу «у роботі \ пауза»;
- синусоїда, яка малюється у режимі реального часу, виходячи з даних, обрахованих системою.

Повна схема пристрою має такий вигляд і включає у себе такі датчики\сенсори для отримання і обрахування отриманих даних у реальному часі (рисунок 2.11).

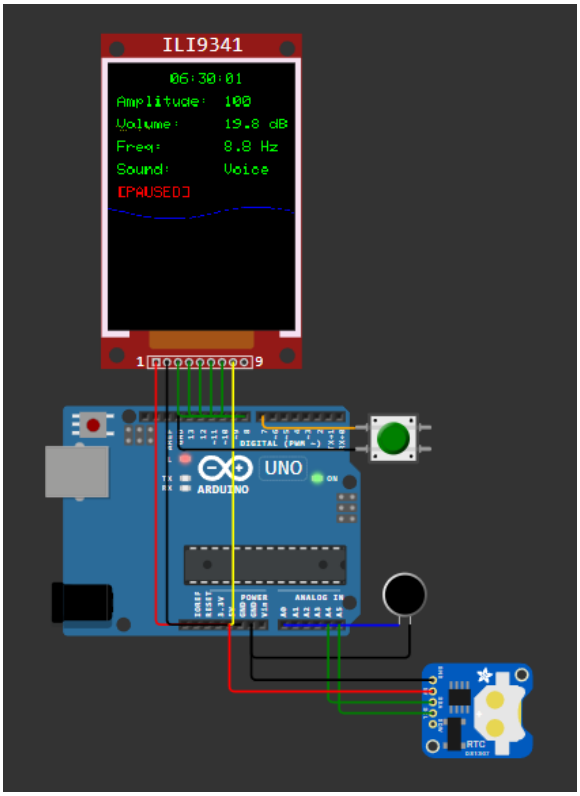

Рисунок 2.11 - Повна модель проєкту

У процесі реалізації проєкту було використано кілька сенсорів, кожен з яких виконує свою специфічну функцію для забезпечення повного аналізу

звукового середовища.

Мікрофонний модуль (аналоговий мікрофон) був використаний для безпосереднього зчитування звукових коливань із навколишнього середовища.

Мікрофон перетворює акустичні сигнали в аналоговий електричний сигнал, який далі аналізується мікроконтролером. Саме цей сенсор дозволяє вимірювати амплітуду та частоту звукових сигналів, а також розраховувати рівень гучності в децибелах. Це основний сенсор, що відповідає за виявлення присутності та характеристик звуку.

RTC-модуль (годинник реального часу) DS1307 був застосований для отримання точного поточного часу. Завдяки йому пристрій фіксує, коли саме було зафіксовано той чи інший звуковий сигнал. RTC дозволяє не залежати від живлення мікроконтролера і зберігає час навіть при вимкненні живлення, що дуже важливо для довготривалого моніторингу.

Кнопка керування (Pushbutton) використовується як інтерфейс керування користувачем. За допомогою неї можна увімкнути або зупинити процес аналізу. Це дає змогу вручну призупиняти роботу пристрою для фіксації поточних результатів або для паузи у вимірюваннях, що підвищує зручність використання.

Таким чином, було розглянуто та впроваджено три основні елементи введення: аналоговий мікрофон, годинник реального часу та кнопку керування, кожен із яких виконує важливу роль у загальній роботі пристрою та сприяє досягненню його цілей — а саме:

- аналізу;
- відображення;
- класифікації звуків у реальному часі.

Так як проєкт було розроблено в онлайн симуляторі Wokwi, прикладається два коди. Перший – код основної програми мікроконтролеру, другий – код підключення елементів.

2.1 Вибір мікроконтролеру, основних датчиків і сенсорів

Перед початком виконання роботи постало питання, який з мікроконтролерів зможе виконувати поставлену задачу якомога краще, буде використовувати найменше зовнішніх ресурсів і остаточно – буде задовольняти потреби як виконавця, так і користувача апарату.

Основоположні мікроконтролери, які спали на думку і були обрані за для тестування і вибору у подальшій роботі були такі, а саме:

- Arduino Uno;
- Raspberry Pi;
- ESP 32.

У процесі аналізу можливих варіантів мікроконтролерів для реалізації проєкту «Розробка пристрою аналізу звукового спектра на базі Arduino з OLED-дисплеєм» було розглянуто три основні платформи: Arduino Uno, Raspberry Pi та ESP32. Кожна з них має свої переваги, однак остаточний вибір було зроблено на користь Arduino Uno з таких причин:

- Arduino Uno є простою у використанні платформою з великою кількістю прикладів, бібліотек та документації, що суттєво спрощує розробку проєкту:

- плата має достатні технічні характеристики для обробки аудіосигналу в режимі реального часу у межах поставлених завдань;

- низьке енергоспоживання та стабільна робота дозволяють використовувати Arduino в автономному пристрої;

- Arduino Uno забезпечує просту інтеграцію з OLED-дисплеями та звуковими сенсорами без потреби у складній конфігурації або додатковому програмному забезпеченні;

- на відміну від Raspberry Pi, Arduino не потребує операційної системи, що зменшує час завантаження та спрощує запуск пристрою. ESP32 хоча й має кращі технічні характеристики, однак для даного проєкту вони не є критично необхідними, а використання Arduino дозволяє реалізувати

завдання ефективніше та з меншими затратами часу на налаштування.

Arduino Uno (рисунок 2.12) має загалом 20 доступних виводів вводу/виводу, не враховуючи пінів живлення. Їх можна умовно поділити на кілька груп за призначенням.

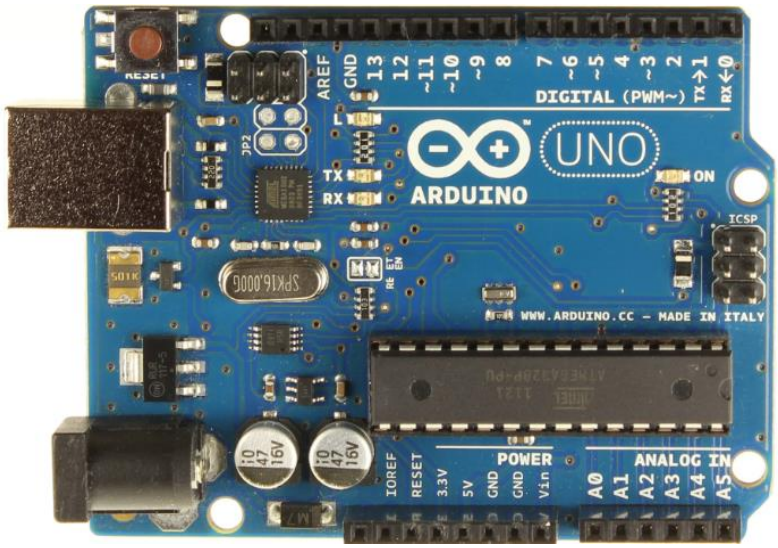

Рисунок 2.12 – Мікроконтролер Arduino Uno

Цифрові пін-и (Digital pins) 14 пінів – D0–D13 Можуть працювати як вхід або вихід для цифрових сигналів (LOW або HIGH). D0 (RX) і D1 (TX) – використовуються для серійної передачі даних (Serial), наприклад, при зв’язку з комп’ютером. D3, D5, D6, D9, D10, D11 – підтримують ШІМ (PWM) (аналогова модуляція) – позначаються символом "~" на платі.

Аналогові входи (Analog inputs) 6 пінів – A0–A5 Використовуються для зчитування аналогових сигналів (наприклад, з датчиків температури, освітлення тощо). Також можуть використовуватись як цифрові пін-и при потребі. A4 та A5 використовуються для протоколу I2C (SDA і SCL).

Живлення (Power pins) VIN – вхід для зовнішнього живлення (7–12 В). 5V – стабілізоване живлення 5 В (вихід). 3.3V – стабілізоване живлення 3.3 В (вихід). GND (Ground) – земля (нульовий потенціал), кілька пінів. AREF – опорна напруга для аналогово-цифрового перетворювача.

Спеціальні пін-и RESET – ручне скидання контролера (перезапуск програми). IOREF – дає змогу платам-додаткам (shields) дізнатися напругу живлення логіки (зазвичай 5 В).

Перейдемо до наступного мікроконтролеру – Raspberry Pi (рисунок 2.13). Raspberry Pi має 40-контактний GPIO-роз’єм (General Purpose Input/Output), який містить різні типи виводів для роботи з електронними компонентами.

Рисунок 2.13 – Мікроконтролер Raspberry Pi

Загальна кількість пінів: 40 Ці піни поділяються на кілька категорій за призначенням.

Живлення 2 пін-и «5V» – стабільне живлення 5 В (наприклад, для датчиків або модулів). 2 пін-и 3.3V – стабільне живлення 3.3 В (основна логіка Raspberry Pi). 8 пінів «GND» (земля) – з’єднання з нульовим потенціалом (мінус).

Цифрові GPIO-піни 26 пінів – загального призначення (GPIO), які можуть використовуватись як вхід або вихід для цифрових сигналів. Можуть

бути програмно налаштовані як PWM, I2C, SPI, UART тощо.

Деякі GPIO-піни мають альтернативні функції (в залежності від налаштування): UART (послідовний інтерфейс): GPIO14 (TXD) – передача GPIO15 (RXD) – прийом I2C (шина для зв'язку з датчиками, дисплеями): GPIO2 (SDA) GPIO3 (SCL) SPI (швидкісний інтерфейс): GPIO7 (CE1), GPIO8 (CE0) – чип-селект GPIO9 (MISO), GPIO10 (MOSI), GPIO11 (SCLK).

Raspberry Pi потребує завантаження ОС (Linux), тому керування пінами зазвичай відбувається з Python або Bash.

Наостанок розглянемо мікроконтролер ESP32 (рисунок 2.14) та його характеристики. ESP32 DevKit V1 — це потужна плата розробника на базі модуля ESP32-WROOM-32, яка поєднує в собі мікроконтролер із вбудованим Wi-Fi та Bluetooth.

Рисунок 2.14 – Мікроконтролер ESP32

Живлення 3.3 В — вихід стабілізованої напруги 3.3 В. VIN (або 5V) — вхід для зовнішнього живлення (5–12 В). GND (земля) — спільний нульовий потенціал. EN (Enable) — пін увімкнення/скидання ESP32.

Цифрові GPIO-піни До 30 GPIO пінів доступні для цифрового вводу/виводу. Кожен GPIO може бути налаштований програмно. Деякі піни мають обмеження (наприклад, використовуються при завантаженні).

Комунікаційні інтерфейси Більшість GPIO можуть бути використані для цифрових протоколів: UART (послідовний інтерфейс): TX, RX – для серійного з’єднання, наприклад з комп’ютером чи GPS. I2C (двопровідна

шина): Будь-які два GPIO можуть бути налаштовані як SDA (дані) та SCL (годинник). Для підключення дисплеїв, сенсорів, EEPROM тощо. SPI (швидкісний інтерфейс): Використовується для дисплеїв, карт пам’яті, інших модулів.

Аналогові входи та виходи ADC (Analog to Digital Converter): До 18 пінів підтримують аналоговий ввід. Діапазон напруги: 0 – 3.3 В. DAC (Digital to Analog Converter): 2 піна (GPIO25, GPIO26) – генерують аналогову напругу.

PWM (широтно-імпульсна модуляція) Підтримується на всіх GPIO. Застосовується для регулювання яскравості світлодіодів, швидкості двигунів тощо.

Touch Sensor (сенсорні входи) До 10 GPIO підтримують ємнісний дотик (наприклад, T0–T9). Можна створювати сенсорні кнопки без фізичних контактів. [4]

Розглянувши основні параметри і підтвердивши вибір мікроконтролеру для проєкту, перейдемо до вибору основних датчиків та сенсорів. Використання Arduino для аналізу звукового спектра дозволяє створити компактний і ефективний пристрій, здатний в реальному часі обробляти аудіосигнали та виводити результати на OLED-дисплей.

Застосування алгоритму швидкого перетворення Фур’є (FFT) у поєднанні з відповідним підсилювачем і мікрофонним модулем відкриває широкі можливості для аудіовізуалізації та подальшого цифрового аналізу сигналів навіть на недорогих платформах. [5]

Звичайний аналоговий мікрофон для Arduino (рисунок 2.15), як правило, є електретним мікрофоном, який працює за простим принципом зміни ємності між мембраною та зарядженою пластиною під впливом звукових хвиль.

У результаті утворюється слабкий аналоговий сигнал, який потрібно підсилювати, щоб Arduino міг його зчитати через аналогові входи. Без підсилення такий сигнал може бути недостатньо сильним для точного

зчитування мікроконтролером.

Рисунок 2.15 – Модуль мікрофону LM393

На противагу їм, мікрофони MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) (рисунок 2.16) створюються за технологією мікросхем і мають мініатюрні механічні елементи, розміщені прямо на кремнієвій підкладці.

Рисунок 2.16 – Модуль MEMS мікрофону SPH8878LR5H-1

. Ці мікрофони можуть мати як аналоговий, так і цифровий, що дозволяє напряму передавати цифровий аудіосигнал без проміжного аналого-цифрового перетворення. Завдяки цьому MEMS-мікрофони забезпечують вищу якість звуку, стабільні параметри, кращу стійкість до шумів і меншу

сприйнятливість до вібрацій. Проте їх підключення — особливо у випадку цифрових моделей — вимагає розуміння специфічних інтерфейсів, а також підтримки з боку мікроконтролера. Вони зазвичай дорожчі, ніж аналогові електрети, але виграють у якості, стабільності та можливостях інтеграції. [2]

Обравши мікрофонний модуль наступним кроком для нас є вибір системи виводу інформації для користувача, а саме – екран. Найпопулярнішими варіантами для Arduino та подібних платформ є OLED- та TFT-дисплеї.

OLED (Organic Light-Emitting Diode) (рисунок 2.17) дисплеї працюють за принципом самосвітіння пікселів — кожен піксель сам випромінює світло, тому не потребує підсвічування.

Рисунок 2.17 – OLED дисплей

Завдяки цьому вони мають глибокий чорний колір, високий контраст і хорошу видимість навіть за слабкого освітлення. OLED-дисплеї часто мають невеликі розміри — наприклад, 0.96 або 1.3 дюйма — і низьке енергоспоживання, що робить їх ідеальними для компактних або енергоефективних пристроїв.

Проте їх роздільна здатність зазвичай обмежена (наприклад, 128×64 пікселів), і вони переважно одно- або двоколірні (білий, синій, жовтий тощо). Також важливо враховувати, що OLED має певний ресурс роботи, і при статичному зображенні пікселі можуть "вигоріти".

TFT (Thin Film Transistor) (рисунок 2.18) дисплеї — це різновид рідкокристалічних екранів із активною матрицею.

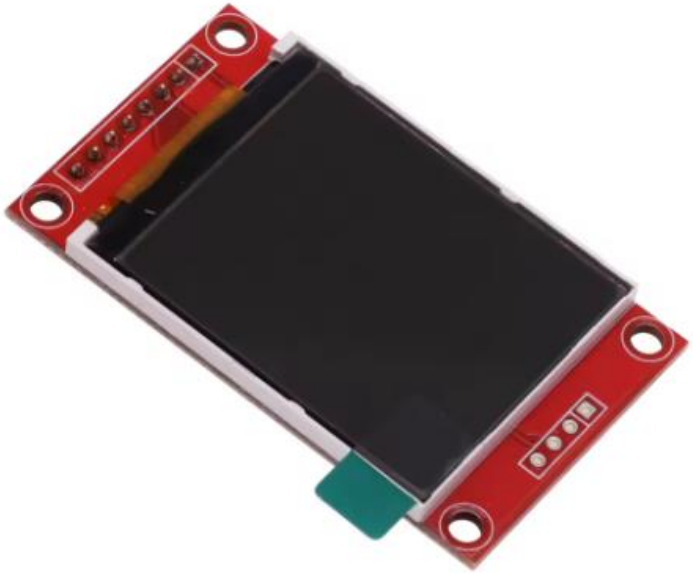

Рисунок 2.18 – TFT дисплей

Вони підтримують повний спектр кольорів і мають значно більшу роздільну здатність, ніж OLED-аналогі такого ж розміру. TFT-дисплеї дозволяють виводити детальну графіку, кольорові зображення, графіки та навіть відео. Вони бувають у різних розмірах — від 1.8 до 3.5 дюймів і більше — і підтримують сенсорне керування. Водночас вони потребують підсвічування, мають вищу енергоспоживаність та, як правило, повільнішу швидкість оновлення у порівнянні з OLED. Наостанок, перейдемо до датчику реального часу (рисунок 2.19).

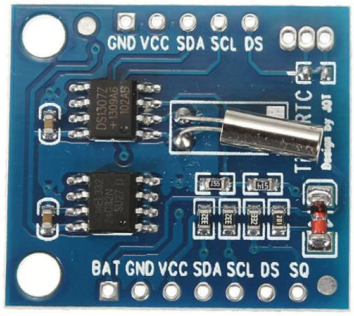

Рисунок 2.19 – Датчик реального часу DS1307

DS1307 — це модуль реального часу (RTC), який дозволяє точно відстежувати годину, хвилини, секунди, а також день, місяць, рік і день тижня. Він зберігає час навіть при вимкненому живленні завдяки наявності батарейки, що забезпечує автономну роботу годинника. У нашому проєкті цей модуль використовується для зручнішого користування інструментом — завдяки йому користувач може зрозуміти, у який момент часу стався той чи інший «показник» і головне – поставити на паузу інструмент, щоб все проаналізувати.

2.2 Інтеграція з іншими системами та пристроями

Щоб не зупинятися на розробці і продовжувати підтримку проєкту, концептуально за для подальшої підтримки можлива реалізація ще додаткових функцій. У етапі розробки вони були відсутні наразі та нереалізовані, але беручи їх до уваги ми можемо використовувати це у подальшому розвитку та розповсюдження інструменту на основі мікроконтролеру у більш широкому спектрі використання.

Першим з таких ідей є підключення до інтернету, а саме IoT і хмари. У контексті даного проєкту, що базується на мікроконтролері Arduino Uno, підключення до Інтернету дозволяє суттєво розширити функціональні можливості пристрою зі спектрального аналізу звукових сигналів.

Оскільки Arduino Uno не має вбудованого Wi-Fi-модуля, для організації підключення до мережі необхідно додати зовнішній модуль зв’язку, наприклад ESP8266 (зокрема, версія ESP-01) або Ethernet Shield для дротового з’єднання. Ще зручнішою альтернативою є повна заміна Uno на ESP32 — мікроконтролер із вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє не лише обробляти сигнали, але й передавати їх у мережу без додаткових модулів. Таке рішення робить систему більш компактною, ефективною та менш енергозатратною. Після фізичного підключення до мережі за

допомогою Wi-Fi відкривається можливість надсилання отриманих акустичних параметрів (амплітуди, частоти, гучності, типу звуку тощо) на хмарні платформи — зокрема ThingSpeak, Blynk, Firebase, Ubidots чи інші. Ці сервіси дозволяють зберігати історію вимірювань, відображати дані у вигляді графіків, створювати дашборди, а також налаштовувати автоматичні сповіщення про події. У випадку більш складних систем також можливо використовувати протокол MQTT, який добре підходить для періодичної або постійної передачі даних у режимі реального часу.

Наприклад, користувач може з мобільного додатку Blynk (рисунок 2.20) зупинити або запустити збір даних, змінити порогові значення, отримати сповіщення або переглянути графіки останніх звукових подій.

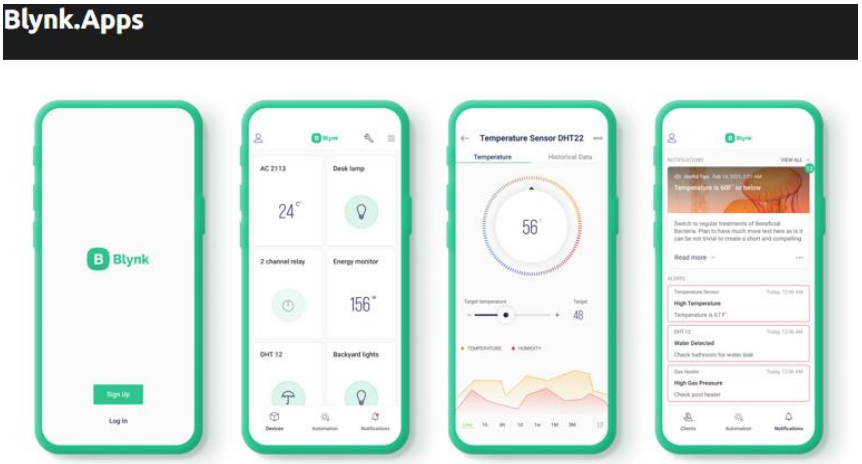

Рисунок 2.20 – Мобільний застосунок Blynk

Це надзвичайно актуально для систем моніторингу довкілля, шумового контролю в офісах, промислових умовах, школах, лікарнях або поблизу транспортних вузлів.

Наступна ідея представляє із себе інтеграцію з ПК-подібними системами або з самим ПК безпосередньо. Інтеграція мікроконтролерного пристрою з комп’ютером відкриває широкі можливості для збирання, обробки, візуалізації та зберігання даних, отриманих із сенсорів.

Найпростіший спосіб такого з’єднання — використання вбудованого в Arduino порту USB, який зазвичай працює як послідовний порт (UART).

Одним із найпоширеніших варіантів є використання середовища Python з бібліотекою PySerial. Це дає змогу легко зчитувати дані, які надсилаються з Arduino і використовувати їх у скриптах для побудови графіків, зберігання у файли, виконання фільтрації чи навіть машинного навчання. Також дані можна автоматично експортувати у формати CSV або Excel. Ще один ефективний інструмент — MATLAB (рисунок 2.21). За допомогою вбудованих функцій MATLAB можна легко налагодити серійне з’єднання з Arduino, зчитувати дані та виконувати складний спектральний аналіз звукових сигналів.

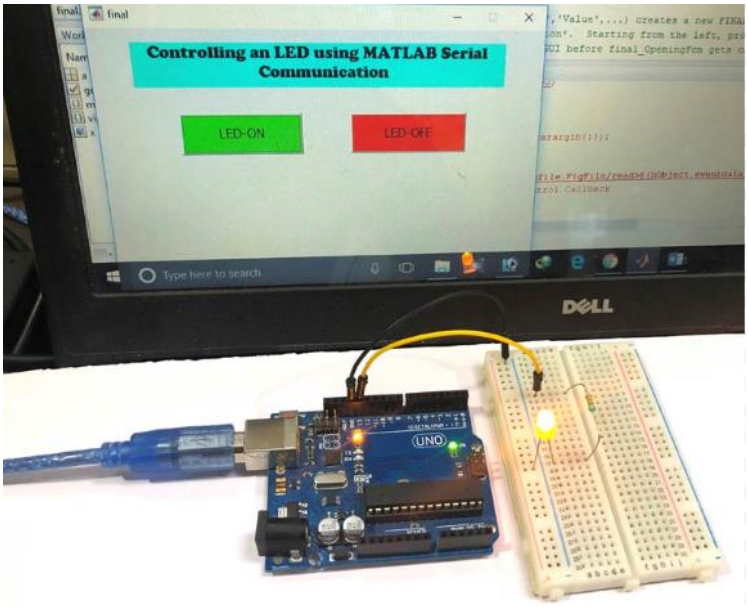

Рисунок 2.21 – Приклад використання MATLAB із Arduino

MATLAB також дозволяє проводити моделювання та створення прототипів розпізнавання звуків. Для візуалізації в реальному часі можна застосовувати середовище Processing — мову та середовище програмування, створене спеціально для інтерактивної графіки. Використовуючи бібліотеку Serial, можна зчитувати значення з Arduino та виводити динамічні графіки,

зображення хвильових форм звуків, візуальні індикатори рівня гучності чи виявленого типу звуку. Інтеграція також дозволяє створити локальні інтерфейси користувача (GUI), наприклад, за допомогою бібліотеки Tkinter (Python) або спеціалізованих середовищ (Qt, Electron), де користувач зможе спостерігати за показниками у зручному форматі, перемикати режими роботи пристрою або запускати аналіз даних вручну. [6]

Остаточною ж ідея має таке формулювання, а саме – голосові інтерфейси та системи. Одним із варіантів реалізації голосового керування є використання спеціалізованих модулів - Elechouse Voice Recognition Module (рисунок 2.22), які можуть розпізнавати заздалегідь записані голосові команди.

Рисунок 2.22 – Модуль Elechouse Voice Recognition V3.0

Цей варіант підходить для вбудованих систем, що не потребують підключення до Інтернету. Команди можуть використовуватися для керування пристроєм, наприклад, увімкнення/вимкнення аналізу звуку, перемикання режимів виводу, налаштування параметрів фільтрації тощо.

Для складніших завдань, зокрема розпізнавання вільної мови, необхідна інтеграція з голосовими асистентами, такими як Google Assistant, Amazon Alexa або Siri. Це можливо завдяки підключенню пристрою до

мережі Інтернет через Wi-Fi (наприклад, за допомогою модуля ESP8266 або ESP32). У цьому випадку дані з мікрофона передаються або на локальний сервер, або в хмару для обробки. Після розпізнавання команда передається назад на Arduino, яке виконує відповідну дію. Такий підхід забезпечує розширену функціональність, можливість інтеграції з іншими «розумними» пристроями та гнучке конфігурування команд. Ще одним напрямом є використання офлайн-розпізнавання мови за допомогою бібліотек, таких як Vosk, CMU Sphinx, які працюють на ПК або Raspberry Pi. У цьому випадку голос обробляється локально, що важливо з погляду конфіденційності та автономності роботи. Взаємодія з Arduino здійснюється через послідовний порт або мережеві протоколи (MQTT, HTTP, WebSocket). [7]

Безумовно, всі ці ідеї ще мають бути допрацьовані і редаговані, але, насамперед хочеться зазначити найважливіший факт – обмеження. Реалізація описаних у проєкті додаткових функцій — таких як підключення до Інтернету (IoT і хмари), інтеграція з ПК, обробка спектральних даних, голосові інтерфейси та віддалене керування — є цілком сучасним і перспективним напрямом розвитку пристрою. Для простих проєктів Uno є чудовим вибором, однак для складних завдань, які передбачають обробку великих обсягів даних, хмарні сервіси або голосову взаємодію, його ресурсів явно недостатньо. Перехід на більш сучасні апаратні платформи, зокрема ESP32 або Raspberry Pi, є доцільним і навіть необхідним кроком для розширення функціональності пристрою. ESP32 — це мікроконтролер нового покоління, що має два ядра з тактовою частотою до 240 МГц, до 520 КБ оперативної пам’яті та вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth. Завдяки цьому ESP32 здатен не лише здійснювати обробку сигналів, а й передавати дані до хмари без додаткових модулів. Цей контролер підтримує сучасні інтерфейси для аудіо, що дозволяє реалізовувати прості голосові інтерфейси, локальне або віддалене управління, а також автоматизацію пристроїв через мережу. У випадках, коли потрібна обробка мови, розпізнавання голосу в реальному часі, взаємодія з асистентами на кшталт Google Assistant або Alexa, а також

складна візуалізація даних чи машинне навчання — найкращим варіантом є використання Raspberry Pi. Це вже не просто мікроконтролер, а повноцінний комп’ютер із операційною системою (рисунок 2.23), підтримкою багатьох мов програмування (Python, C++, JavaScript) і доступом до величезної кількості бібліотек.

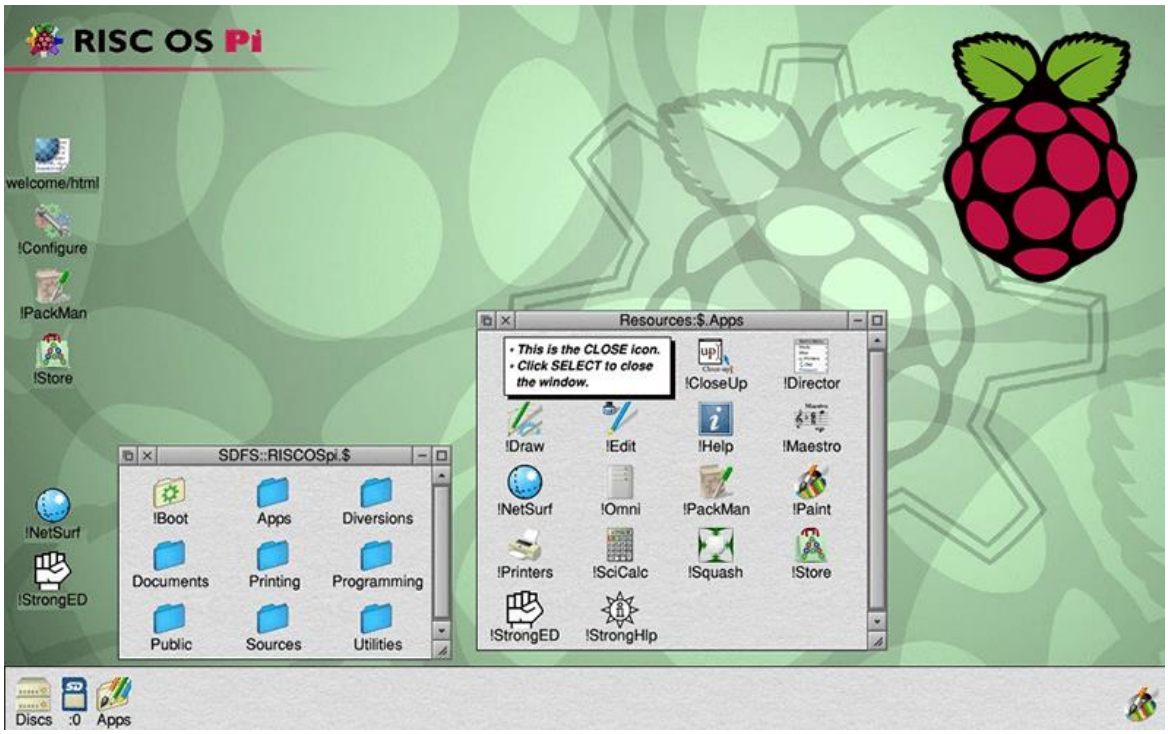

Рисунок 2.23 – ОС Raspberry Pi

Raspberry Pi дає змогу підключити мікрофони, камери, дисплеї, локально розпізнавати мову (за допомогою Vosk, Picovoice, CMU Sphinx), підключатися до баз даних, запускати MQTT-брокери та забезпечувати глибоку інтеграцію з іншими цифровими системами.

3 ТЕСТУВАННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ

Тестування пристрою проводилося у системі онлайн-симулятора Wokwi, що дозволяє дуже надійно та без зайвих витрат ресурсів реалізувати проєкт з усім необхідним функціоналом і з використанням різних типів сенсорів. Завдяки цьому середовищу була можливість ретельно перевірити алгоритми обробки звуку, виведення даних на дисплей, а також роботу з кнопкою та годинником реального часу. Симулятор також дав змогу здійснювати налагодження коду без потреби у фізичному обладнанні, що значно пришвидшило процес розробки. [8]

Розглянемо вади (проблеми), які були усунені під час реалізації проєкту. На ранньому етапі проєктування, користувачам було складно зрозуміти характер звуку, який фіксує система — амплітуда і частота відображалися лише числово або не візуалізувалися зовсім. Це ускладнювало діагностику, аналіз і зворотний зв’язок при налаштуванні пристрою. Завдяки реалізації функції вималювання, була вирішена проблема відсутності наочної візуалізації звукового сигналу. Тепер користувач бачить живе графічне представлення хвилі звуку — це допомагає краще розуміти, який сигнал надходить, чи він стабільний, чи слабкий, чи взагалі є. Така графіка також зручна для відлагодження мікрофонної частини та загальної взаємодії з пристроєм. Наступним кроком стало те, що пристрій реагував на будь-який звук однаково, не розрізняючи його природу — голос людини, музику або фоновий шум від техніки. Це призводило до невірної інтерпретації вхідного аудіосигналу. Наприклад, музику система могла сприймати як людську мову, а звук вентилятора — як активність користувача. Завдяки впровадженню цієї функції розрізнення типу звуку була вирішена проблема класифікації звуків за характером. Тепер система може аналізувати параметри аудіосигналу (частоту та амплітуду) й визначати тип звуку, що дозволяє їй реагувати більш розумно. Ігнорувати шум машин або техніки, активуватись лише при розмові

чи музиці. Це значно підвищило точність і корисність роботи пристрою. Останнім же штрихом налаштування стало додавання та налаштування кнопки. Адже забір інформації відбувається безперервно, а аналіз її у моменті іноді необхідно провести безпосередньо у даний момент часу. Спочатку кнопка оброблялася неналежним чином — кожне натискання викликало декілька повторних спрацювань, або навпаки — кнопка не реагувала, бо обробка відбувалась у кожному циклі без перевірки змін. Це призводило до нестабільного керування, наприклад, пауза вмикалася й одразу вимикалася, або пристрій поводився непередбачувано. Завдяки налагоджені коду реалізовано захист від багаторазового спрацювання та надійне визначення моменту натискання. Тепер натискання кнопки викликало чітку однократну дію, а саме постановку пристрою на паузу, що значно підвищує стабільність і зручність керування. [9]

Практичне ж застосування пристрою може бути дуже різноманітним. Зокрема, його можна використовувати:

- для моніторингу рівня шуму в приміщеннях, таких як школи, офіси чи лікарні, де важливо дотримуватись комфортного звукового середовища;

- у "розумних будинках" як частину системи автоматичного реагування на звук — наприклад, для виявлення гучного звуку чи голосу;

- для технічної діагностики обладнання — аналізуючи характерні частоти й амплітуди звуку, можна виявляти несправності у роботі двигунів або механізмів;

- для освітніх або демонстраційних цілей, щоб наочно показувати учням і студентам, як працює обробка звукового сигналу, і як із нього можна отримати фізичні параметри, такі як частота чи гучність.

ВИСНОВКИ

Розробка пристрою для аналізу звукового середовища в реальному часі з використанням Arduino та онлайн-симулятора Wokwi була виконана в рамках кваліфікаційної роботи. У процесі роботи було розглянуто застосування кількох ключових компонентів: аналогового мікрофона для зчитування звукових коливань, модуля реального часу, а саме RTC DS1307, для фіксації точного часу подій, а також кнопки керування як елементу взаємодії з користувачем.

Завдяки можливостям Wokwi було проведено всебічне тестування функціоналу пристрою без потреби у фізичному обладнанні, що дозволило значно пришвидшити розробку та налагодження програмної частини. Також було реалізовано зручний інтерфейс виводу даних на дисплей, включаючи відображення амплітуди, гучності, частоти та типу звуку, що дає змогу ефективно класифікувати аудіосигнали.

У підсумку було підтверджено, що пристрій має широкий спектр практичного застосування: від моніторингу шуму в побутових і робочих середовищах до технічної діагностики та освітніх демонстрацій. Крім того, результати проєкту засвідчили ефективність використання онлайн-інструментів, зокрема симулятора Wokwi, для прискорення процесу розробки, тестування та налагодження вбудованих систем.

Отриманий досвід демонструє доцільність подібного підходу для студентських та науково-дослідницьких проєктів, особливо на етапі прототипування. У перспективі пристрій може бути доопрацьований для підключення до мережі Інтернет (наприклад, через модулі Wi-Fi чи Bluetooth), що дозволить реалізувати віддалений моніторинг звукового середовища та збереження історії даних у хмарі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Блум Д. Вивчаємо Arduino: інструменти та методи технічної магії / Д. Блум. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2014. – 384 с. – ISBN 978-5-4461-0433-9.

2. Сергієнко Д.М. Аудіотехнології: мікрофони, обробка, синтез / Д.М. Сергієнко. – Дніпро: АРТ-ПРЕС, 2020. – 344 с. – ISBN 978-617-7553-44-6.

3. Ковальчук М.В. Аналіз аудіосигналів за допомогою Arduino / М.В. Ковальчук. – Х.: Фоліо, 2022. – 224 с. – ISBN 978-966-03-9547-2.

4. Монк С. Програмування Arduino. Професійна робота зі скетчами / С. Монк. – Berkeley: Maker Media, 2013. – 320 с. – ISBN 978-5-9715-1444-4.

5. Філіппов С.М. Програмування мікроконтролерів Arduino: практичний курс / С.М. Філіппов. – Х.: Ранок, 2021. – 256 с. – ISBN 978-966-74-5129-4.

6. Крафт М. Інтерактивні проєкти з Arduino / М. Крафт. – Львів: Апріорі, 2018. – 336 с. – ISBN 978-966-498-644-3.

7. Банчич І.В. Arduino для початківців / І.В. Банчич. – К.: Діалектика, 2020. – 304 с. – ISBN 978-617-7561-12-3.

8. Каліберда А. С., Піскарьов О. М. Аналіз звукового спектра цифровими методами. Експериментальні та теоретичні дослідження в контексті сучасної науки: матеріали VIII Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Львів, 18 квітня, 2025 рік / ГО «Молодіжна наукова ліга». Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2025. – С. 137 – 139.

9. Каліберда А. С., Піскарьов О. М. Розробка мікроконтролерної системи реального часу для аналізу звукового спектра з графічною візуалізацією. Інформаційні технології в сучасному світі: Державний біотехнологічний ун-т, : зб. матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практ. Конф. – Харків, 2025. – С. 436 – 437.