

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет радіоелектроніки
Факультет Комп'ютерних наук
Кафедра Програмної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Дослідження методів цифро-аналогового перетворення для відтворення
механічних коливань за допомогою програмно-апаратного комплексу

Виконав:

студент 2 курсу групи ІПЗм-20-4
Даниленко С. Д.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 121 – Інженерія програмного
забезпечення

Тип програми Освітньо-наукова

Керівник доц. Вечур О. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. Кафедри _____

З. В. Дудар

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерних наук _____
 Кафедра _____ Програмної інженерії _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 121 – Інженерія програмного забезпечення _____
 (код і повна назва)
 Тип програми _____ освітньо-наукова програма _____
 Освітня програма _____ Інженерія програмного забезпечення _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студента _____ Даниленка Станіслава Дмитровича _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження методів цифро-аналогового перетворення для відтворення механічних коливань за допомогою програмно-апаратного комплексу».

затверджена наказом по університету від «24» 03 2022р. № 412Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії
 «__» _____ 202_ р.

3. Вихідні дані до роботи специфікація Arduino та вентиляторів, дослідження та програмні бібліотеки з реалізацією перетворення Фур'є, технологія nodeJS, клієнт-серверна архітектура, діаграми UML.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі вступ, аналіз предметної галузі, формування вимог та постановка задачі, проектування архітектури системи та розробка алгоритму, опис прийнятих рішень та розробленої програмної системи, висновки, перелік джерел посилання, додатки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної галузі, огляд існуючих досліджень та рішень	24.01.2022- 15.02.2022	виконано
2	Постановка задачі, моделювання, розробка алгоритму та архітектури ПЗ	16.02.2022- 28.02.2022	виконано
3	Розробка та тестування програмно-апаратного комплексу	01.03.2022- 20.03.2022	виконано
4	Проведення експериментів	21.03.2022- 10.03.2022	виконано
5	Підготовка пояснювальної записки	11.04.2022- 09.05.2022	виконано
6	Перевірка пояснювальної записки керівником, підготовка роботи для проходження перевірок	10.05.2022- 14.05.2022	виконано
7	Оцінка роботи рецензентами, отримання відзиву від керівника кваліфікаційної роботи, отримання результатів перевірки на плагіат та нормоконтроль	15.05.2022- 20.05.2022	виконано
8	Попередній захист роботи	21.05.2022	виконано
9	Здача роботи у електронний архів, допуск роботи до захисту завідувачем кафедри та передача готової роботи секретарю ЕК	21.05.2022	виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05.2022	

Дата видачі завдання _____ 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Вечур О.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ / ABSTRACT

Кваліфікаційна робота магістра містить: 111 стор., 23 рис., 10 табл., 6 додатків, 38 джерел.

АРДУІНО, ВЕНТИЛЯТОР, ВІДТВОРЕННЯ, ЗВУК, ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС, СПЕКТРОАНАЛІЗ, ЦИФРО-АНАЛОГОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ЧАСТОТА.

Об'єкт дослідження – відтворення цифрової звукової інформації.

Мета роботи – розробка програмно-апаратного комплексу для перевірки гіпотези про можливість альтернативного способу передачі звукової інформації.

Методи розробки базуються на таких технологіях як JavaScript, Arduino, nodeJS, npm, HTML5, CSS3, jQuery.

Результатом роботи є перевірка гіпотези з використанням створеного програмно-апаратного комплексу та алгоритму перетворення звукових хвиль для передачі звукової інформації за допомогою впливу повітряних потоків, утворених вентиляторами, на тіло (шкіру) людини.

ARDUINO, DIGITAL-ANALOG CONVERSION, FAN, FOURIER CONVERSION, FREQUENCY, REPRODUCTION, SOFTWARE, SOUND, SPECTROANALYSIS.

The object of research is digital-to-analog conversion of audio information.

The purpose of the work is to develop a software-hardware complex to test the hypothesis about the possibility of an alternative method of transmitting audio information.

Development methods are based on technologies such as JavaScript, Arduino, nodeJS, npm, HTML5, CSS3, jQuery.

The result is a test of the hypothesis using the created software-hardware complex and algorithm for converting sound waves to transmit sound information through the influence of air flows generated by fans on the human body (skin).

Я, Даниленко Станіслав Дмитрович, студент групи ІПЗм-20-4, здобувач вищої освіти на другому (магістерському) рівні кафедри «Програмна інженерія» заявляю: моя кваліфікаційна робота на тему «Дослідження методів цифро-аналогового перетворення для відтворення механічних коливань за допомогою програмно-апаратного комплексу», що буде представлена до ЕК для публічного захисту, виконана самостійно, в ній не містяться елементи плагіату і вона може бути опублікована в електронному архіві відкритого доступу EIArKhNURE. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим положенням «Про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз предметної галузі	9
1.1 Характеристики звуку	9
1.2 Подібні дослідження	13
1.3 Аналіз проблем та актуалізація рішень	14
2 Постановка задачі.....	15
3 Моделювання	18
3.1 Розміщення вентиляторів.....	18
3.2 Апаратна платформа	20
3.3 Математична модель алгоритму.....	21
4 Опис реалізації програмно-апаратного комплексу	31
4.1 Архітектура програмного забезпечення.....	31
4.2 Апаратна реалізація.....	33
4.3 Програмна реалізація	35
4.4 Користувацький інтерфейс	39
4.5 Модуль для програмного розпізнавання.....	44
5 Проведення експерименту	46
5.1 Ідентифікація за допомогою комп'ютера	46
5.2 Експеримент з участю людей	47
5.3 Експеримент зі звуками воєнного часу	57
Висновки.....	60
Перелік джерел посилання	62
Додаток А Звіт результатів перевірки на унікальність тексту	66
Додаток Б Перелік посилань відповідно до наукових досліджень кафедри.....	67
Додаток В Фрагмент лістингу коду	69
Додаток Г Слайди презентації.....	71
Додаток Д Наукові публікації	83
Додаток Е Експертний висновок з нормоконтролю.....	111

ВСТУП

Звук представляє собою коливальний рух частинок середовища (рідини, газу чи твердого тіла), який поширюється у вигляді хвиль. З біологічної точки зору звуком можна вважати коливання, які сприймаються сенсорною системою людей чи тварин. Звук існує об'єктивно та незалежно від сприйняття будь-якими живими істотами. Різні істоти сприймають звуки у різних частотних діапазонах, наприклад, для людини це від 16 Гц до 20 кГц. Однак ці межі відрізняються у різних людей, наприклад, залежно від віку [1].

З народження людина може сприймати звук за допомогою своїх сенсорних систем. Окрім візуального спостереження, за допомогою якого люди отримують більшість інформації з навколишнього світу, більшість процесів супроводжуються характерними звуками, які сприймаються істотами та служать для орієнтування та спілкування. При цьому такі звуки не є ізольованими і мозок виокремлює їх з потоку звуків, які накладаються [2].

Людина досить гарно дослідила звук, зокрема описала його фізично, увівши різні характеристики, такі як частота, довжина хвилі, амплітуда, швидкість звуку та інші [3]. Також людство знайшло використання звуку у своєму технологічному прогресі, та широко використовує його. Але багато людей в усьому світі мають проблеми зі слухом. Частково ця проблема вирішується за допомогою медицини та спеціальними пристроями, такими як слуховий апарат, однак, це не завжди можливо та дієво. Тому є необхідність у дослідженні нестандартних способів відтворення та ідентифікації звуків за допомогою інших сенсорних систем. Одним з таких способів, який слід дослідити, є передача звуків за допомогою потоків повітря, що впливають на тіло (шкіру) людини.

Отже, можна зробити висновок, що попри досить гарно вивчені властивості звуку, наразі є ще недостатньо вивчені альтернативні способи його відтворення, передачі та сприйняття людиною за допомогою сенсорних систем.

Метою даної роботи є розробка програмно-апаратного комплексу для перевірки гіпотези про можливість альтернативного способу відтворення звукової

інформації за допомогою вентиляторів, передачі за допомогою повітря та сприйняття за допомогою шкіри людини.

Об'єктом дослідження є відтворення цифрової звукової інформації.

Предметом дослідження є методи цифро-аналогового перетворення.

При проведенні дослідження використовувалися: теоретичний аналіз, моделювання, практична реалізація та проведення експерименту для формування результатів.

Результатом роботи є перевірка гіпотези про можливість альтернативного способу передачі звукової інформації. Для цього було створено програмно-апаратний комплекс для передачі звукової інформації за допомогою впливу повітряних потоків, утворених вентиляторами, на тіло (шкіру) людини. Розроблено особливий алгоритм перетворення звукових хвиль та цифро-аналогового перетворення. Також було досліджено можливість розпізнавати утворену інформацію за допомогою програмної системи класифікації інформації. Проаналізовано результати та зроблено висновки щодо можливості використання такого способу у реальному житті [4, 5].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ

1.1 Характеристики звуку

Звук представляє собою коливні рухи тіла, що передаються навколишньому повітрю, викликаючи в ньому послідовні згущення та розрідження його частинок. Звукова хвиля невидима, для її розповсюдження необхідне середовище, у вакуумі звукова хвиля існує, однак не розповсюджується.

Розглянемо основні характеристики та властивості звуку. Більшість з них пов'язані з фізичною природою і описуються загальними фізичними властивостями для коливального процесу.

Висота звуку залежить від частоти коливання фізичного тіла, вимірюється в герцах (Гц). Герц – це число періодичних звукових коливань за 1 секунду. За цим показником хвилі поділяються на низькочастотні (не вище 300 Гц), середньочастотні (300-3000 Гц) та високочастотні (більше 3000 Гц). Ультразвук (більше 20 кГц) та інфразвук (менше 16 Гц) людина не сприймає слуховою системою [6, 7]. Візуально різниця зображена на рисунку 1.1.

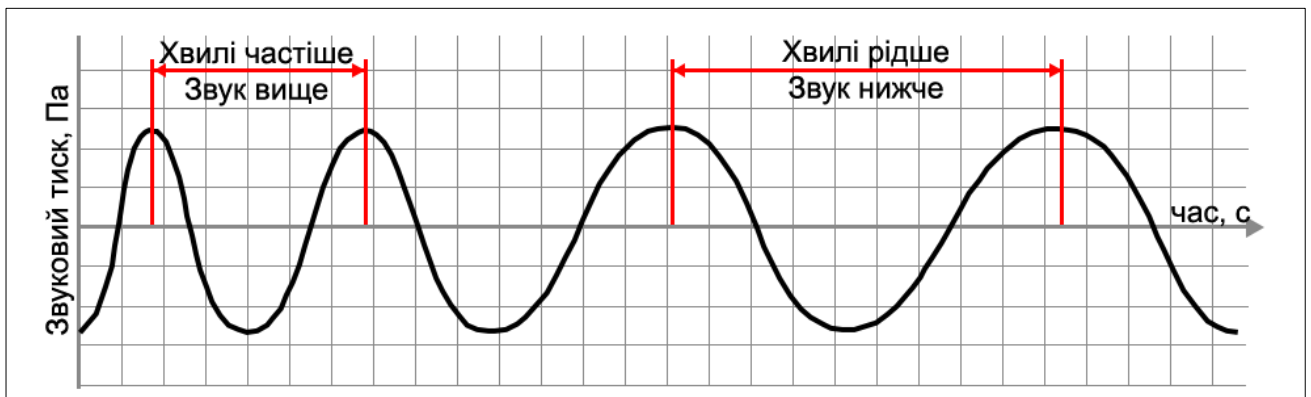


Рисунок 1.1 – Частота коливань та висота звуку [7]

Сила звуку (гучність або звуковий тиск) – визначається амплітудою коливань, чим більша амплітуда, тим гучніше звук. Зазвичай використовується її логарифмічне значення яке вимірюється в децибелах (дБ), проте може вимірюватися як амплітуда тиску повітря у хвилі і в цьому випадку вимірюється в

паскалях (Па). Демонстрацію схематично наведено на рисунку 1.2, де чорний графік відповідає гучнішому звуку, ніж синій [6, 7].

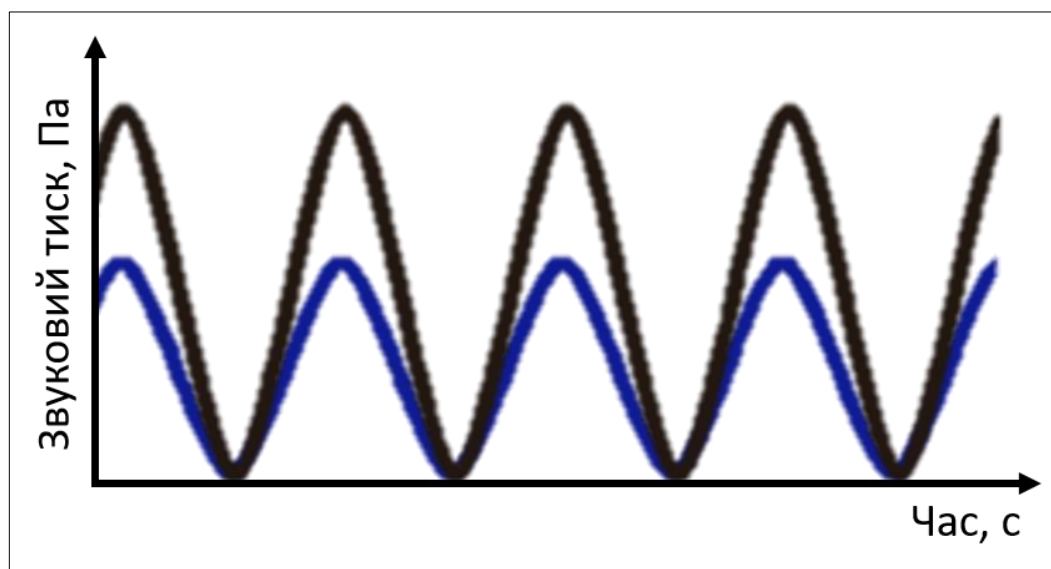


Рисунок 1.2 – Гучність звуку [7]

Людина чує звук, який за своєю суттю є аналоговим сигналом – це неперервний сигнал, що описується хвилею, яка є сумою хвиль простіших звуків. Прикладами аналогового звуку може бути звук відтворений з аудіокасети або вінілової пластинки.

Щоб зберегти та обробляти звук на комп'ютері, його необхідно перетворити у цифровий формат та зберегти у файл спеціального аудіо формату, наприклад, mp3, ogg чи flac. Спочатку з аналогового сигналу фіксуються значення з певним інтервалом часу, в залежності від указаної частоти дискретизації, і отримані значення формують дискретний сигнал. Потім дискретний сигнал обробляється і приймає лише фіксовані значення, такі що можуть бути представлені як кількість квантових величин, і такий сигнал називається цифровим. І саме цифровий сигнал, за певними правилами, записується до цифрового формату та зберігається у файл за допомогою кодера [8].

Звукова хвиля у цифровому форматі описується набором координат, і для того щоб цей звук змогла почути людина, його необхідно знову перетворити в

аналоговий сигнал. Демонстрація відмінностей типів звукового сигналу приведена на рисунку 1.3.

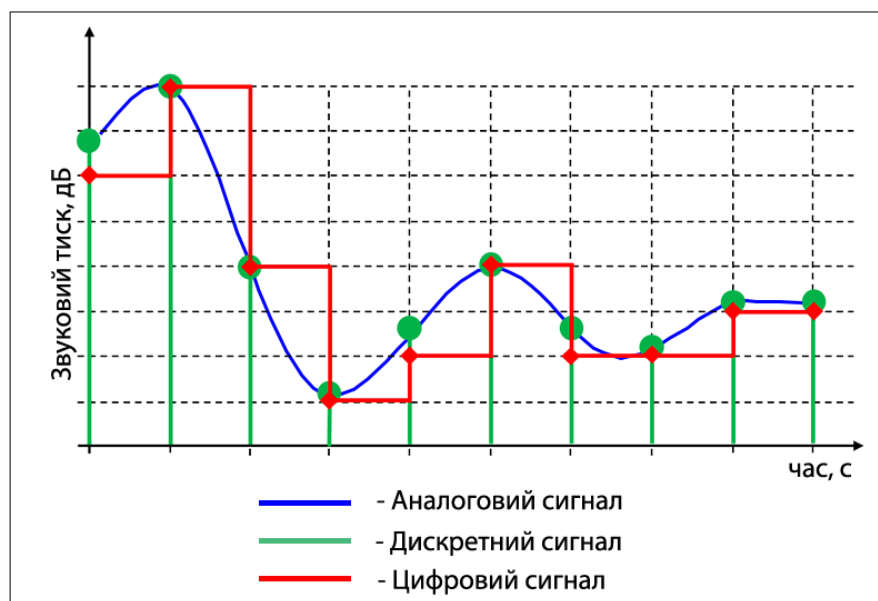


Рисунок 1.3 – Види звукових сигналів [8]

Для перетворення звуку у цифровий сигнал використовуються спеціальні пристрої, такі як мікрофон – для повітряного простору, геофон – для звуків земної кори, гідрофон – для сприйняття звуків у воді. Або ж такий звук генерується на електронному пристрої. Цей процес називається аналогово-цифрове перетворення (АЦП) або дискретизація [9, 10].

Цифровий звук має власні характеристики. Першу з них уже було описано, це – частота дискретизації, вимірюється в герцах (Гц). Чим більша частота дискретизації, тим ширший спектр сигналу буде представлений. Стандартна частота дискретизації 44100 Гц означає, що для однієї секунди буде записано 44100 значень, які називають семплами. Відповідно до теореми Котельнікова, для того щоб однозначно відновити початковий сигнал, частота дискретизації повинна бути більшою ніж в 2 рази ніж найбільша частота в спектрі сигналу [11].

Розрядність – це кількість бітів цифрової інформації для кодування кожного семпла. Чим більша розрядність, тим менша похибка кожного перетворення величини електронного (аналогового) сигналу в цифровий і навпаки.

Кількість каналів – кількість незалежних сигналів, що обробляються/відтворюються одночасно для формування кінцевого звуку.

Бітрейт – кількість бітів, що використовується для передачі/обробки даних за одиницю часу. Від бітрейту залежить розмір файлу з цифровим сигналом. Бітрейт в найпростішому вигляді можна розрахувати як добуток частоти дискретизації, розрядності і кількості каналів [12].

Щодо сприйняття звуку людиною, то існує спеціальна дисципліна – психоакустика, яка вивчає психологічні і фізіологічні особливості сприйняття звуку. Таке вивчення допомагає зрозуміти, яку інформацію людина може отримати зі звукової хвилі, а яка буде проігнорована чи втрачена [13].

Використання знань з психоакустики дозволяє економити простір, необхідний для зберігання цифрового сигналу. Існує багато форматів файлів, які дозволяють записати за допомогою кодера а потім відтворити за допомогою декодера звук, при цьому не зберігати непотрібну інформацію. Розглянемо для прикладу один з найпопулярніших з них – mp3. По-перше цей формат не зберігає інформацію про частоти, які не чує людина. По-друге при формуванні файлу відбувається ряд фільтрацій, в ході яких сигнал розбивається на рівні по часу фрагменти. Гармоніки, що маскуються іншими, вилучаються та замість двох і більше розміщених поруч частотних піків залишається один з середнім значенням. Після таких перетворень відтворити початковий звук повністю буде неможливо, однак з точки зору сприйняття людиною відтворений звук буде мало чим відрізнятися від початкового [14, 15].

Відтворення початкового звуку з цифрового формату в аналоговий відбувається за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). ЦАП у звичному розумінні представляє собою інтегральну схему, яка перетворює цифрове значення в значення напруги і насилає утворене значення у інший механічний пристрій – підсилювач, для формування сигналу достатнього рівня для приведення динаміків у дію. Далі відповідно до отриманого значення напруги відбуваються коливання динаміків з певною частотою, що формує звукову хвилю.

Отже стандартна процедура запису та відтворення звуку має наступну послідовність: фіксація сигналу, АЦП, кодування, збереження у файл та виконання дій з ним, декодування, ЦАП, відтворення сигналу [16].

1.2 Подібні дослідження

Альтернативне розповсюдження та сприйняття звуку має важливе значення, в першу чергу для людей, які мають проблеми зі слухом. Тому було розроблено велику кількість слухових апаратів, принцип роботи яких базується на п'єзоелектричному ефекті – тобто передачі звуку безпосередньо до внутрішнього вуха за допомогою кісткової провідності. Розвитку цього напрямку сприяють дослідження матеріалів з п'єзо провідністю. Також ці матеріали почали використовуватися у сучасній електроніці та сфері розваг [17].

У минулому столітті, в післявоєнні часи досліджувався спосіб мікрохвильового слухового ефекту, який отримав назву ефекту Фрея. Це ефект спочатку фіксувався під час бойових дій та вважався слуховою галюцинацією. Після досліджень було встановлено, що цей спосіб можна використовувати для того, щоб безпосередньо передавати інформацію у мозок людини. Однак, ці дослідження не отримали подальшого розвитку і цим способом вдалося лише передати інформацію про цифри від 1 до 10 [18].

З точки зору комп'ютерної обробки звуку розвиваються знання зі спектроаналізу, який дозволяє виокремлювати необхідні характеристики із звукової хвилі. При цьому для його виконання зазвичай використовується перетворення Фур'є та його модифікації: швидке та дискретне, з застосуванням різних віконних функцій, які дозволяють виокремлювати чи приховувати ті чи інші характеристики [19]. Знання зі спектроаналізу також лежать у основі роботи систем з розпізнавання звуків та мовлення, які досягли достатньої продуктивності, щоб працювати у потоковому режимі, та достатньої компактності та енергоефективності для того, щоб працювати автономно та у складних умовах [20, 21].

Проте досліджень, пов'язаних з ідеями, що розглядаються у цій роботі виявлено не було. Було знайдено дослідження, в якому розглядалася розробка цифро-аналогового перетворювача для апаратної платформи як TMS320X281X від TI company. Проте в ньому досліджувалася можливість генерації хвиль за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), а потім застосовувалося перетворення Фур'є для накладання фільтрів за допомогою чого отримувався необхідний згладжений аналоговий сигнал [22, 23].

1.3 Аналіз проблем та актуалізація рішень

Вентилятори приводяться у рух за допомогою струму, який представляє собою аналоговий сигнал, проте звукові дані фіксуються у цифровому вигляді і для їх відтворення вентилятором необхідно виконати цифро-аналогове перетворення.

Існує велика кількість цифро-аналогових перетворювачів, наприклад з послідовною, паралельною архітектурою, чи такі що базуються на широтно-імпульсній модуляції (ШІМ). Вони представляють собою складні радіотехнічні пристрої і відрізняються точністю та якістю відтвореного сигналу. Такий пристрій не може вирішити задачу обчислення значень на частотних діапазонах та розподілення між вентиляторами. Розподілення можна було б виконати за допомогою фільтрів, однак при цьому необхідно щоб значення уже були підготовленими і зрозумілими для фільтра. До того ж, при зміні кількості вентиляторів, доведеться використовувати інші фільтри, а вони також представляють собою механічні пристрої, які неможливо налаштувати інакше за потребою. На даний момент не існує усіх програмних та апаратних компонентів, які можна було б використати для реалізації задачі, що розглядається [24].

Виникає необхідність у розробці оригінального цифро-аналогового перетворювача, який буде базуватися на програмній обробці сигналу, буде гнучким для масштабування та легко піддаватися змінам в роботі алгоритму, має включати функції підготовки значень та розподілення їх між вентиляторами, а саме перетворення в значення напруги може виконуватися одним з відомих способів.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Постає задача у дослідженні альтернативного способу відтворення цифрового звукового сигналу, який може бути розпізнаний людиною за допомогою шкіри. Для цього необхідно перевірити гіпотезу про можливість відтворення та сприйняття людиною звукової інформації, що переноситься за допомогою потоків повітря та впливає на шкіру людини.

Для перевірки гіпотези необхідно розробити програмно-апаратний комплекс та провести експерименти з участю людей. Комплекс має складатися з апаратного пристрою, який за допомогою під'єднаних до нього вентиляторів буде генерувати повітряні потоки на основі звукової інформації, та програмного забезпечення, яке буде забезпечувати обробку вхідної інформації за допомогою унікального алгоритму та функціонування вузлів комплексу.

Критерієм для визнання дієвості альтернативного способу відтворення звукових хвиль є правильна кількість ідентифікацій класу початкового звуку. Позначимо це значення як Y :

$$Y = \frac{n}{N} * 100\% ,$$

де n – кількість звуків, що було ідентифіковано вірно;

N – загальна кількість звуків, що були перевірені.

Це число показує відсоток правильних ідентифікацій.

Однак експеримент буде проводитися для звуків різної тривалості та при участі різної кількості класів звуків. Тому позначимо цю величину як $Y(ct)$:

$$Y(c_i t_j) = \frac{n(c_i t_j)}{N(c_i t_j)} * 100\% ,$$

де i – порядковий номер елемента з множини кількості звуків;

c_i – кількість звуків з певної множини;

j – порядковий номер з набору тривалості звуків;

t_j – тривалість звуків в секундах з певної множини.

Для підтвердження гіпотези встановлюється необхідний мінімальний відсоток правильних ідентифікацій при проведенні експерименту – 75% при можливих похибках та з урахуванням зовнішніх факторів. При цьому гіпотеза може бути підтверджена чи спростована для кожного окремого набору характеристик кількості і тривалості звуків.

Необхідну кількість класів звуків для експерименту не можливо передбачити, оскільки подібні дослідження не проводилися. Тому пропонується взяти спочатку невелику кількість звуків, яка буде достатня, наприклад, для подання критично важливих сигналів, та бути не більше 5. Після чого збільшувати кількість зі сталим кроком, (наприклад 5) до тих пір, поки відсоток правильних ідентифікацій не буде менше 50%. Тому початкова множина визначається як {5, 10, 15} та далі кількість може бути збільшена. При цьому самі звуки мають бути такими, які людина може почути у повсякденному житті.

Тривалість звуків визначається множиною {2, 5, 10} секунд, оскільки багато звуків, зокрема механічного походження, мають періоди повторення, такі як звуки сирен чи дзвінка в двері. За 5 секунд людина з гарним слухом зможе ідентифікувати більшість звуків, за 2 секунди це не завжди можливо, а 10 секунд в деяких критичних випадках може бути забагато, оскільки вони потребують швидкої реакції на події, що відбуваються.

Додатково можна перевірити можливість розпізнавання інформації, утвореної комплексом за допомогою користувача, відмінного від людини. Необхідно класифікувати отриману інформацію програмним способом за допомогою одного з класичних методів класифікації. Для цього, відповідно, необхідно реалізувати окремий програмний модуль і використовувати його для експерименту.

Програмне забезпечення для комплексу має бути реалізованим з використанням мови програмування, яка може бути запущеною на популярних

настільних операційних системах: Linux, Mac OS, Windows та не використовувати сторонні програмні бібліотеки, використання яких передбачає отримання платної ліцензії. Має бути реалізована можливість отримання звукової інформації з аудіо файлу формату mp3 та звуку з навколишнього середовища за допомогою мікрофону.

Апаратною платформою має бути вибрана сучасна платформа з великою кількістю модулів, які за необхідністю можна легко придбати та підключити. Для розробки програмного забезпечення для апаратного пристрою не має використовуватися приватна мова програмування, що має забезпечити можливе доопрацювання широкого кола спеціалістів з програмної інженерії.

3 МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Розміщення вентиляторів

Перший пункт, який необхідно вирішити, це те, яким чином необхідно розмістити вентилятори, щоб людина або інший отримувач інформації з повітряних потоків міг явно ідентифікувати, яку саме інформацію несе йому повітряний потік.

Виходячи з характеристик цифрового звуку, для обробки найкраще зможе підійти така характеристика як частота звуку разом з амплітудою, яка буде показувати, яка частота у якій мірі була представлена у початковому сигналі.

Людина повинна має знаходитися перед вентилятором і за допомогою шкіри ідентифікувати з якого вентилятора йде потік повітря та з якою силою. Відповідно одночасно можуть працювати декілька вентиляторів незалежно один від одного, що буде сигналізувати про відтворення різних частотних діапазонів з вхідного сигналу. Для цього вентилятори пропонується розмістити в одній площині у вигляді квадратної пластини, наприклад з сіткою 3 на 3 (див. рисунок 3.1).

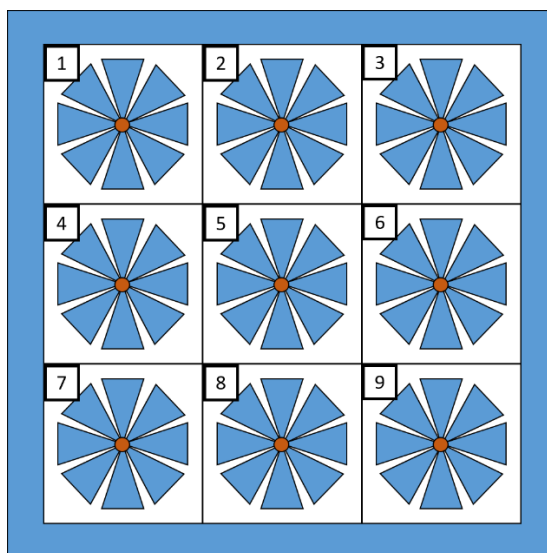


Рисунок 3.1 – Розміщення вентиляторів

Таке розміщення буде сприяти простішому розумінню отриманої інформації, де кожен з рядків вентиляторів буде відповідати певному діапазону частот: верхній

(1, 2, 3) – високим частотам, середній (4, 5, 6) – середнім та нижній (7, 8, 9) – низьким і за кожним вентилятором буде закріплено діапазон конкретних частот. Детальніше наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Відповідність вентиляторів частотним діапазнам

№ вентилятора	Частотний діапазон
1	19,53 – 21,96 кГц
2	17,09 кГц – 19,52 кГц
3	14,65 кГц – 17,08 кГц
4	12,3 кГц – 14,64 кГц
5	9,77 кГц – 12,2 кГц
6	7,33 кГц – 9,76 кГц
7	4,89 кГц – 7,32 кГц
8	2,45 кГц – 4,88 кГц
9	16 Гц – 2,44 кГц

Виходячи з описаної вище інформації, конфігурація з таким розміщенням вентиляторів є мінімально необхідною, оскільки менше 3 по вертикалі неможливо використовувати для розділення на описані зрозумілі для людини діапазони, а використання меншої кількості вентиляторів по горизонталі збільшить значення діапазону, що відповідає кожному вентилятору. Тому у подальшому може виникнути необхідність дослідження конфігурації з більшою кількістю вентиляторів, але не меншою. При цьому квадратна структура є найбільш варіативною і, за потреби, принцип роботи може бути змінено на інший без необхідності зміни компонентів фізично. Також, окрім квадратних, можуть бути розглянуті прямокутні конфігурації, оскільки саме такі форми відповідають максимальним площам на тілі людини, якими вона може фіксувати інформацію з потоків.

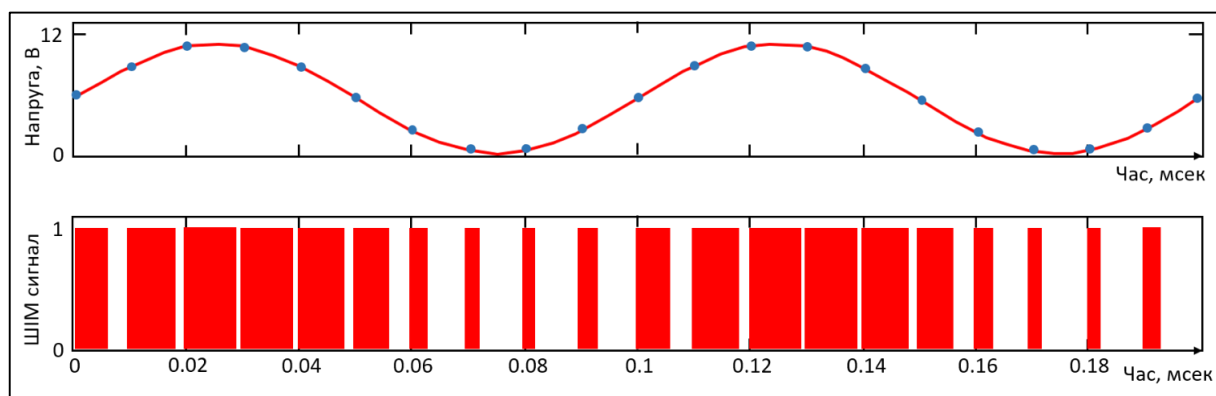
Якщо говорити про фіксацію утворених потоків повітря за допомогою механічних отримувачів, то це можливо організувати за допомогою дзеркально

розміщених вентиляторів з принципом роботи як у фізичного приладу – анамометра з подальшим аналогово-цифровим перетворенням.

3.2 Апаратна платформа

Платформою для роботи вентиляторів необхідно вибрати Arduino через доступність пристроїв та додаткових компонентів, універсальність та простоту створення програмного забезпечення. Мова програмування для Arduino має звичний для великої кількості програмістів синтаксис [25].

Швидкість обертання вентиляторів залежить від величини значення напруги, яка на них подається, проте платформа Arduino потребує постійний струм для свого функціонування та не може змінювати це значення для периферійних пристроїв, однак плата має декілька виходів, які забезпечують ШІМ, який є одним зі стандартних способів досягнення цифро-аналогового перетворення, за допомогою якого можна подавати напругу на підключені вентилятори не постійно, а інтервалами, цим самим регулюючи швидкість їх обертання [26]. Приклад такого перетворення наведено на рисунку 3.2.



Рисунки 3.2 – ШІМ сигнал [26]

При цьому процесі вхідні дані представляють собою цифрові значення, а на виході отримується неперервне значення напруги, яке є аналоговим. Отже саме цифро-аналогове перетворення буде відбуватися тут, однак для нього необхідно

мати підготовлені дані. Вибрані вентилятори повинні мати спеціальний пін для опрацювання ШІМ сигналу [27].

3.3 Математична модель алгоритму

Загальна схема алгоритму наведена на рисунку 3.3, де зазначено усі етапи обробки та пересилки вхідної цифрової інформації та безпосереднє цифро-аналогове перетворення засобами ШІМ.

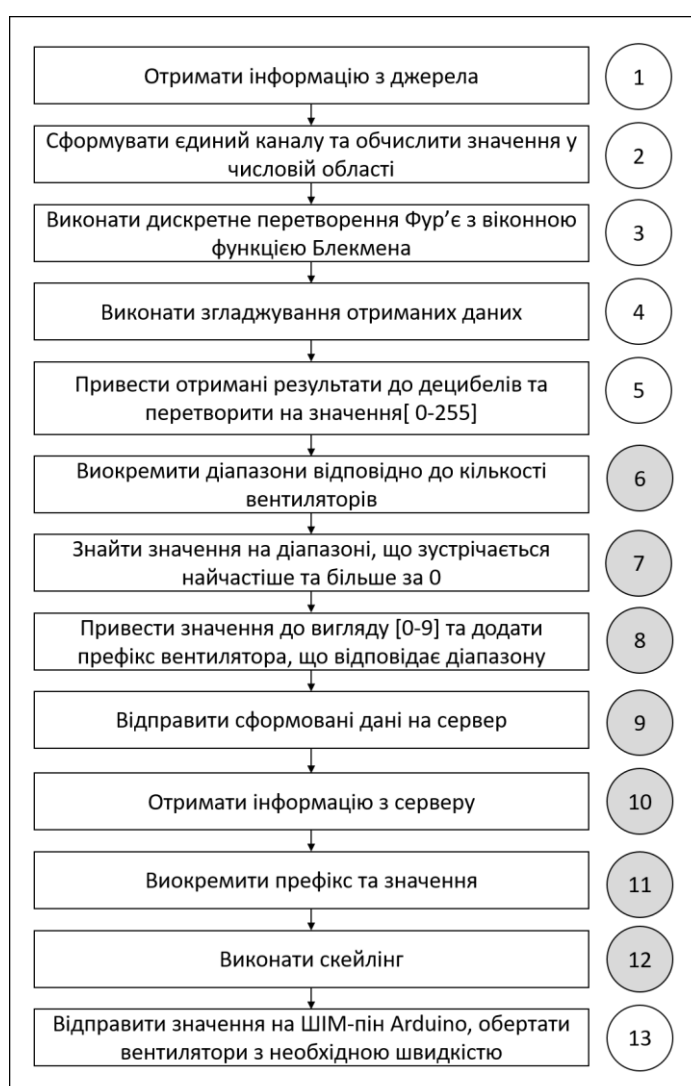


Рисунок 3.3 – Кроки алгоритму

Як уже зазначалося раніше, під час роботи алгоритму, необхідно отримати інформацію з одного з визначених джерел, провести спектроаналіз та отримати її

частотну характеристику і обробити її таким чином, щоб значення могло бути перетворене за допомогою широтно-імпульсної модуляції на аналогове значення напруги на вентиляторі.

Пункти 1-8 представляють собою процеси обробки та кодування, пункти 9-10 процес передачі даних певного формату з клієнту, який виконує перетворення у потоковому режимі на кінцевий пристрій за допомогою проміжного вузла – серверу. Кроки 11-13 представляють собою зворотній процес – декодування та ШІМ перетворення.

На даний момент не існує програмного рішення поставленої задачі. Окремо існують реалізації алгоритмів роботи з аудіо даними з джерел, роботи з аудіо каналами, перетворення Фур'є, згладжування та віконні функції для обробки сигналів та конвертації одних величин в інші. Окремо реалізовані функції для роботи з апаратними компонентами Arduino. Проте не існує алгоритмів, які зможуть групувати отримані результати зі спектроаналізу за діапазонами та знаходити на них елементи, які зустрічаються найчастіше, після чого зводити результат до формату, який повністю може вмістити в собі необхідне значення та включати номер вентилятора, на якому значення має бути відтвореним. При цьому має включати можливість зворотного перетворення та масштабування для конкретного вентилятора.

Тому кроки 6-12 з представленої алгоритму реалізовано самостійно, для проведення дослідження, інші кроки представляють собою використання програмних бібліотек чи вбудованих апаратних команд Arduino. Далі кроки алгоритму будуть розглянуті детальніше.

На першому кроці отримується необхідна потокова інформація з джерела з частотою дискретизації 44,1 кГц.

На другому кроці сигнал приводиться до моно вигляду, тобто з 2 і більше каналів створити один, чи залишити інформацію як є, у випадку з сигналом у режимі моно. Цей сигнал є представленням початкового сигналу і називається представленням у часовій області.

Третій крок представляє собою розкладання потокового звукового сигналу на частоти, з яких він складається. До даних з часової області застосовується вікно Блекмена, яке забезпечує, щоб сигнали, що відрізняються від піка на 58 децибел не були прихованими [28]. Ілюстрацію наведено на рисунку 3.4.

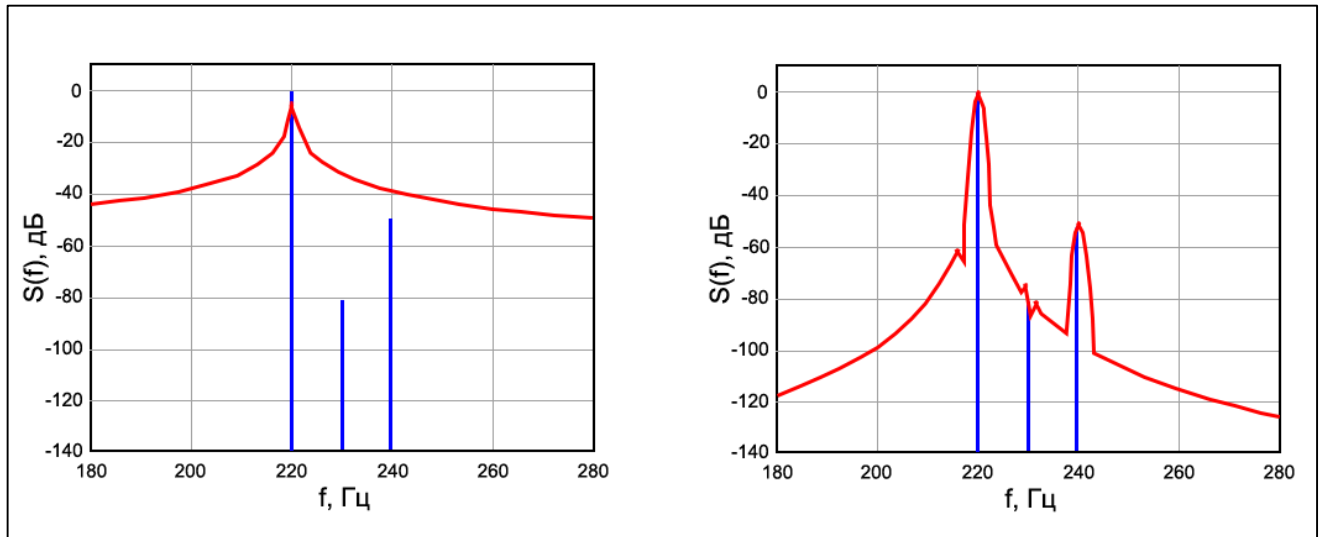


Рисунок 3.4 – Застосування вікна Блекмена [28]

У цьому випадку також можуть використовуватися інші віконні функції, такі як Геммінга, Блекмена-Наттала, прямокутна, Кайзера. Вибрана віконна функція є збалансованою і не дозволяє приховувати велику кількість частотних сигналів та при ній не виникають побічні ефекти [28].

Нехай x – це значення сигналу у часовій області, N – кількість значень, що обробляються, n – порядковий номер значення, тоді відповідно:

$$n = 0, \dots, N - 1. \quad (1)$$

Встановлюємо наступні параметри для вікна Блекмена:

$$\alpha = 0.16, a_0 = \frac{1-\alpha}{2}, a_1 = \frac{1}{2}, a_2 = \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Тоді функція приймає вигляд:

$$\omega[n] = a_0 - a_1 \cos \frac{2\pi n}{N} + a_2 \cos \frac{4\pi n}{N}, \quad (3)$$

де α, a_0, a_1, a_2 з (2);

n, N з (1).

А оброблений сигнал обчислюється відповідно:

$$\hat{x}[n] = x[n]\omega[n], \quad (4)$$

де $n, x[n]$ з (1);

$\omega[n]$ з (3).

Далі застосовуємо перетворення Фур'є, яке ставить у відповідність часову область функції до її частотної області. Складові частоти представляються піками в частотній області.

Для застосування швидкого перетворення коефіцієнту встановлюється значення 2048. Це означає, що на виході будуть отримані значення для 1024 частотних точок, та для 1 секунди буде проведено 21 аналіз [29].

Визначаємо k як порядковий номер значення:

$$k = 0, \dots, N - 1, \quad (5)$$

де N з (1).

Та $X[k]$ як комплексне значення у частотній області:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{x}[n] W_N^{-kn},$$

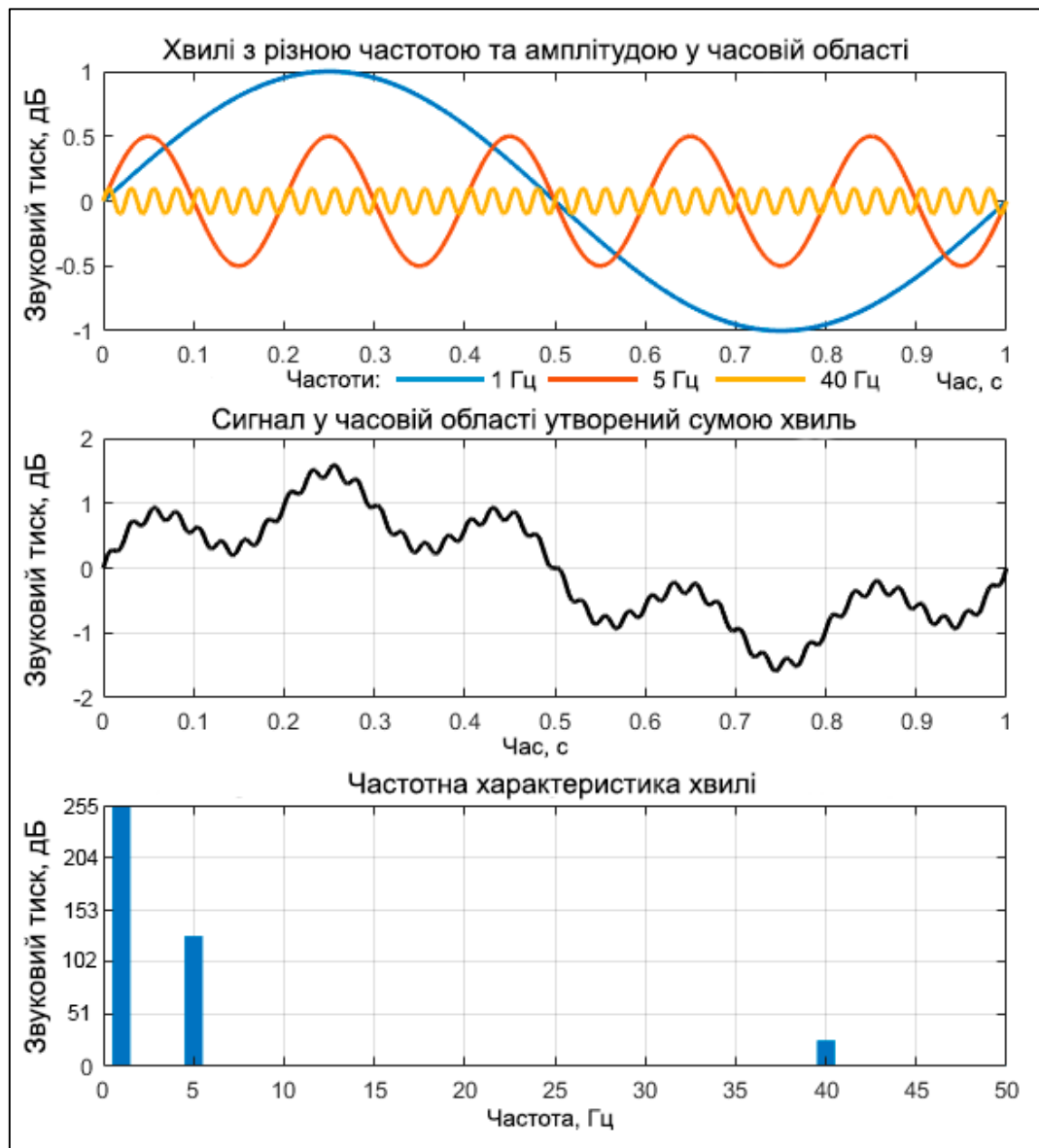
$$W_N = e^{2\pi i/N}, \quad (6)$$

де k з (5);

N, n з (1);

$\hat{x}[n]$ з (4).

Детальніше процес формування звукової хвилі та перетворення Фур'є наведено на рисунку 3.5.



Рисунк 3.5 – Формування хвилі та отримання частотної характеристики після перетворення Фур'є [29]

На четвертому кроці застосовуємо згладжування до отриманих результатів.

Нехай $\hat{X}_{-1}[k]$, де k з (5) це результат цієї операції в попередньому блоці. Попередній блок представляє собою буфер обчислений попереднім знаходженням згладжених даних чи масив з нулів, якщо це перше обчислення.

Встановимо τ як константу для згладжування.

Тоді згладжене значення $\hat{X}[k]$ обчислюється наступним чином:

$$\hat{X}[k] = \tau \hat{X}_{-1}[k] + (1 - \tau)|X[k]|, \quad (7)$$

де k з (5);

τ – встановлена константа, дорівнює 0,8;

$\hat{X}_{-1}[k]$ – результат цієї операції в попередньому блоці;

$X[k]$ з (6).

На п'ятому кроці обчислюємо значення в децибелах Y за допомогою формули:

$$Y[k] = 20 \log_{10} \hat{X}[k], \quad (8)$$

де k з (5);

$\hat{X}[k]$ з (7).

Отримуємо значення у діапазоні -120..0, яке показує відносну різницю між звуковим тиском хвиль різної частоти.

Далі виконується приведення значення до вигляду зручного для подальшого опрацювання у числовий діапазон 0-255 за допомогою формули (9), позначимо це значення b . Це дозволяє фільтрувати дані та уникнути небажаних даних у вигляді викидів [16, 30, 31].

$$b[k] = \left\lfloor \frac{255}{dB_{max} - dB_{min}} \right\rfloor (Y[k] - dB_{min}), \quad (9)$$

де k з (5);

dB_{max} – константи, що задаються експериментатором, дорівнює -30;

dB_{min} – константи, що задаються експериментатором, дорівнює -100;

$Y[k]$ з (8).

На цьому було виконано стандартні операції спектроаналізу, після чого застосовуються самостійно розроблені кроки для формування результуючих значень та передачі на кінцевий пристрій.

На шостому кроці після усіх вище описаних кроків ми отримуємо масив з N бінами, проте через особливості перетворення Фур'є ми отримуємо дзеркальний результат і можна використовувати лише одну з двох частин, тому в результаті отримуємо масив розміром $N/2$, що представляють собою силу звукового тиску b на певних частотах A , значення яких визначається формулою:

$$A[q] = q * B/C, \quad (10)$$

де q – порядковий номер біна, $q = 0, \dots, N/2-1$;

B – частота дискретизації;

C – кількість ділянок, для яких буде знаходитися частотна характеристика.

Наприклад, для $B = 44,1$ кГц та $C = 2048$ значення $A[n]$ будуть наступними:

- $A_0: 0 * 44100 / 2048 = 0$;
- $A_1: 1 * 44100 / 2048 = 21,5$ Гц;
- $A_2: 2 * 44100 / 2048 = 43$ Гц;
- $A_3: 3 * 44100 / 2048 = 64,6$ Гц;
- $A_{N/2-1}: 1024 * 44100 / 2048 = 22$ кГц.

Що покриває увесь діапазон частот, що може чути людина. При цьому велике значення має «влучання» частотної точки в пік на початковому сигналі. Саме тому для спектроаналізу було вибране значення 2048, яке дозволяє проводити аналіз доволі часто і цим самим збільшити кількість «влучань».

Однак вентилятори не можуть змінювати швидкість обертання 21 раз на секунду, тому половина отриманих значень при обробці ігноруються, але оскільки звуки мають період коливаний то це не сильно впливає на кінцевий результат.

Далі отриманий масив даних, який поділяється на кількість вентиляторів I (в конкретній конфігурації дорівнює 9) та отримані результати будуть групуватися

для цієї кількості і кожен з вентиляторів буде відтворювати значення лише для деякого діапазону частот з конкретною кількістю частотних точок j :

$$j = N/2/I, \quad (11)$$

де N з (1);

I – визначається конфігурацією пристрою.

Тоді позначимо конкретний вентилятор як i :

$$i = 0, \dots, 8. \quad (12)$$

А відповідні крайові значення A діапазону, який йому відповідає обчислюються за формулою:

$$A_{min(i)} = A[j * i]; A_{max(i)} = A[j * (i + 1)], \quad (13)$$

де j з (11);

i з (12).

Тоді діапазон частот для конкретного вентилятора позначається як m :

$$m[i] = (A_{min(i)} \dots A_{max(i)}), \quad (14)$$

де i з (12);

$A_{min(i)}$ та $A_{max(i)}$ з (13).

Сусідні значення A з (10) будуть віднесені до одного з вентиляторів і кінцеве значення буде обчислюватися на основі їх відповідних значень b з (9).

На цьому кроці на кожному з обчислених діапазонів визначається значення, яке зустрічається найчастіше (мода) та є більшим за 0. Саме це значення після подальших перетворень буде відповідати швидкості обертання вентилятора. Позначимо це значення, як v :

$$v[i] = Mo(b[m[i]]), \quad (15)$$

де i з (12);

Mo – мода числових значень для діапазону;

$b[m]$ з (9) та (14) та значення більше за 0.

На восьмому кроці значення v з (14), яке на даний момент може бути максимально 255 після перетворення в (9), переводиться у шкалу 0-9 з правилами математичного округлення та позначається як V :

$$V[i] = v[i] / 255 * 9, \quad (16)$$

де i з (12);

$v[i]$ з (15).

Після чого до значення додається префікс, що відповідає порядковому номеру вентилятора. Для 9 вентиляторів значення може бути максимально 99. Для використання без знакового байтового вигляду [0-255] для передачі по мережах дротового каналу зв'язку, накладається обмеження в 24 вентилятори і відповідне максимально допустиме значення 249. Для передачі значень для більшої кількості вентиляторів необхідно використовувати вигляд відмінний від беззнакового байтового і забезпечити його передачу більш складними каналами та протоколами зв'язку. Тоді фінальне значення, яке надсилається на кінцевий пристрій, у описаному випадку, визначається як u :

$$u = (i + 1) * 100 + V[i], \quad (17)$$

де i з (12);

$V[i]$ з (16).

Кроки 9 та 10 не мають математичного опису та представляють собою передачу утворених значень по каналу зв'язку до кінцевого пристрою.

На 11 кроці для інтерпретації отриманого сигналу кінцевим клієнтом необхідно виконати зворотні перетворення: відділити префікс вентилятора p за допомогою ділення без остатку на 100:

$$p = u / 100 , \quad (18)$$

де u з (17);

p є одним з (12).

Та значення, яке буде перетворене у значення напруги U , знаходячи остачу від ділення на 10.

$$U[p] = u \% 10 , \quad (19)$$

де p з (18);

u з (17).

На 12 кроці необхідно виконати перетворення значення у діапазон 0-255 за допомогою математичних операцій, при цьому необхідно виконати скейлінг – масштабування значення в залежності від мінімального значення від якого конкретний вентилятор починає працювати. Це значення може бути вказаним у специфікації, або визначатися експериментально в залежності від стану вентилятора. Позначимо значення як F та визначимо у формулі (20):

$$F[i] = L[i] + U[p]/9 * (255 - L[i]) , \quad (20)$$

де i з (11);

$L[i]$ – мінімального значення від якого вентилятор починає працювати;

$U[p]$ з (18);

p з (17), при цьому $i = p$.

На 13 кроці виконується направлення отриманих значень на ШІМ порти за допомогою виклику стандартних апаратних функцій Arduino.

4 ОПИС РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ

4.1 Архітектура програмного забезпечення

Процес обчислення необхідних значень, описаних у попередньому пункті є досить складним, тому передбачається реалізація клієнт-серверної архітектури, де усі обчислення будуть відбуватися у клієнта, який представляє собою ізольований програмний додаток, у якому реалізовано отримання вхідної інформації, її обробка та забезпечення користувацького інтерфейсу.

Клієнт-серверна архітектура широко використовується при розробці сучасних веб-застосунків та де-факто є стандартом галузі. Зараз виникають багато різноманітних варіацій, таких як мікросервіси, хмарні додатки, однак при цьому зберігаються її основні властивості та переваги, які полягають у розподіленні навантаження та зони відповідальності клієнта та сервера. У цьому конкретному випадку клієнт та сервер може бути розміщено як на одному вузлі – для реалізації єдиного пристрою для місцевого використання, так і на декількох – для віддаленого керування відтворенням звуку [32].

Описаний вище алгоритм та вимоги до користувацького інтерфейсу можна реалізувати за допомогою мови програмування JavaScript, оскільки в ній присутня технологія Web Audio API, яка дозволяє використовувати мікрофон пристрою, реалізувати завантаження файлів у систему з користувацького інтерфейсу та має вбудовану реалізацію для перетворення Фур'є [31].

Далі сформовані результати мають бути надіслані на сервер, який є проміжним вузлом та забезпечує ідентифікацію кінцевого пристрою та зв'язок з ним. Для спрощення розробки та запобігання додаткових операцій перетворення даних, серверну частину також необхідно реалізувати з використанням мови програмування JavaScript та відповідної серверної технології nodeJS. Також це дозволить використовувати велику кількість реалізованих програмних бібліотек з пакетного менеджера npm. Взаємодія між клієнтом та сервером організовується за допомогою протоколу HTTP та передачею даних у форматі JSON, що на сьогоднішній день є де-факто стандартом.

Комп’ютерна станція, на якій розміщено сервер має універсальні інтерфейси USB, а Arduino має COM порт, який забезпечує двосторонню передачу інформації у байтовому вигляді. Тому комунікацію цих пристроїв необхідно забезпечити саме за допомогою зазначених інтерфейсів.

Архітектура комплексу, який буде розроблено, зображена на діаграмі розгортання на рисунку 4.1.

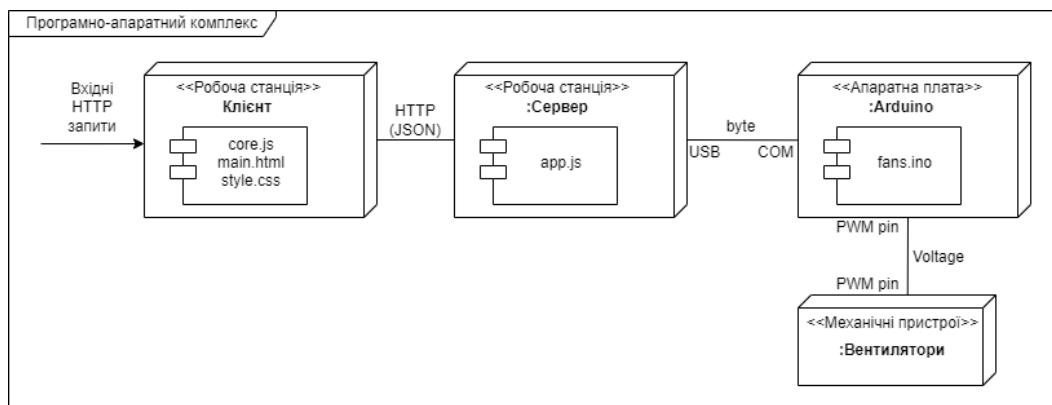


Рисунок 4.1 – Діаграма розгортання

Де, окрім вузлів, додатково позначено інтерфейси, за допомогою яких вузли обмінюються інформацією та типи даних інформації.

А стандартний варіант використання розробленого комплексу зображено на діаграмі послідовності на рисунку 4.2.

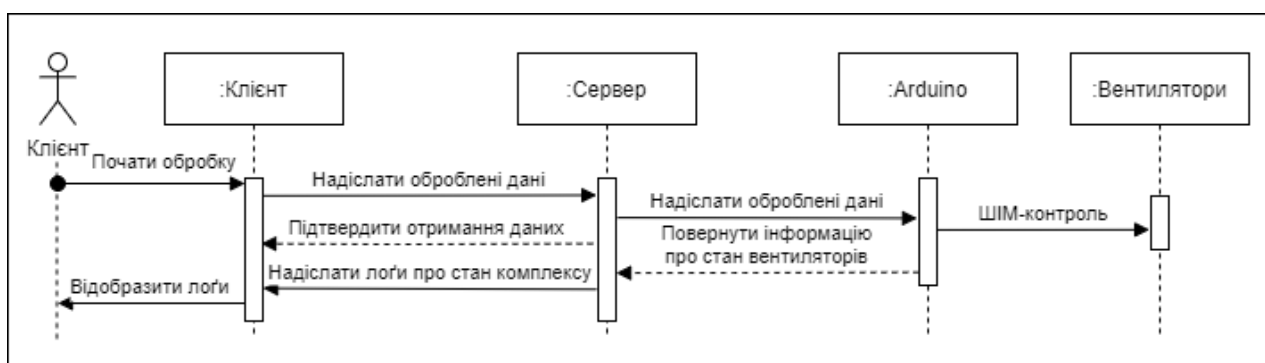


Рисунок 4.2 – Діаграма послідовності

Для точності та виявлення можливих помилок, кожна операція, виконана під час роботи комплексу, має бути підтверджена після виконання та підтвердження

має бути надіслане до вузла, який ініціював операцію. Повідомлення про помилки мають надходити до людини, яка керує комплексом для негайного прийняття нею відповідних рішень для виправлення помилок.

4.2 Апаратна реалізація

Було розроблено комплекс для відтворення та перенесення звукових хвиль за допомогою повітря відповідно до описаної архітектури. Основою апаратної частини була вибрана модифікація Arduino MEGA 2560, оскільки у цій версії доступна мінімально необхідна кількість виходів для ШІМ контролю периферійних пристроїв. Вона під'єднана до серверу за допомогою каналу зв'язку – дротового зв'язку через послідовний порт – двонаправлений послідовний інтерфейс, призначений для обміну байтовою інформацією, з боку плати та інтерфейсу USB з боку серверу [33]. Характеристики наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики Arduino [33]

Характеристика	Значення
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга	7-12 В
Усі цифрові входи/виходи	54
ШІМ входи/виходи	14
Постійний струм через входи/виходи	40 мА
Флеш-пам'ять	256 кБ
Оперативна пам'ять	8 кБ
Тактова частота процесора	16 МГц

Живлення плати відбувається через під'єднання до комп'ютерної станції.

Кількість вентиляторів та їх розташування відповідає вказаній інформації на етапі моделювання – до Arduino під'єднана пластина з дев'ятьма вентиляторами

Delta Electronics ASB0412MA з характеристиками, наведеними у таблиці 4.2. Максимально можна було б під'єднати 12 вентиляторів, але в цьому випадку була б прямокутна структура, яка є менш універсальною та придатною до можливих змін в роботі алгоритму. Вентилятори мають 4 піни, один з яких під'єднаний до ШІМ піну Arduino і є контрольним, тобто таким, через який за допомогою широтно-імпульсної модуляції Arduino може контролювати швидкість руху обертання. Ще 2 піни забезпечують живлення, при цьому плата та вентилятори мають єдину нульову фазу, а один є датчиком обертів та залишається вільним від будь-яких під'єднань.

Живлення вентиляторів постійним струмом 12 В забезпечується автономним блоком живлення, який під'єднується до звичайної розетки з напругою 220 В [34].

Таблиця 4.2 – Характеристики вентиляторів [34]

Характеристика	Значення
Висота	40 мм
Ширина	40 мм
Глибина	10 мм
Робоча напруга	12 В
Сила струму	0,08А
Рівнем шуму	20,5 дБ
Потужність	480 мВат
RPM (обертів за хвилину)	5000

У даній реалізації сервер та клієнт фізично розміщуються на єдиній робочій станції, яка підключена до джерела змінного струму 220 В та представляє собою комп'ютерний пристрій на будь-якій настільній операційній системі, що підтримує роботу програмного забезпечення на мові програмування JavaScript (Linux, MacOS, Windows). Має декілька інтерфейсів USB для з'єднання з Arduino, потребує не менше 2 Гб оперативної пам'яті, 512 Мб постійної пам'яті та базову тактову частоту процесора не менше 1 ГГц. Проте, як було вказано раніше, ці компоненти

можуть бути розміщені на двох окремих апаратних вузлах з характеристиками, наведеними вище.

Загальний вигляд розроблених апаратних компонентів, які представляють собою експериментальний зразок, наведено на рисунку 4.3.

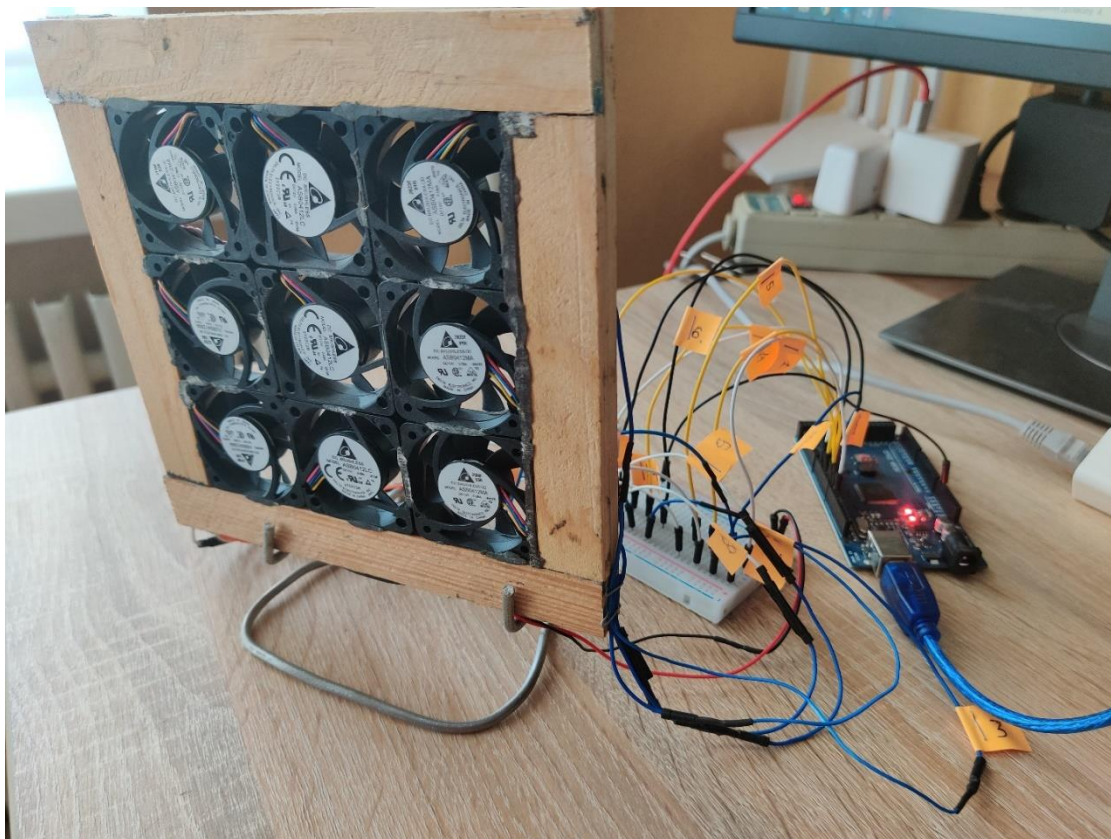


Рисунок 4.3 – Апаратна частина комплексу

Для виконання з'єднання між апаратними компонентами використовується макетна плата, що дозволяє змінювати конфігурацію за потребою.

4.3 Програмна реалізація

Програмна частина комплексу була реалізована з використанням мов програмування, розглянутих на етапі моделювання: JavaScript та C-подібної мови програмування Arduino. Також для реалізації користувацького інтерфейсу

використовувалися технології HTML5 та CSS3 з використанням бібліотеки компонентів Bootstrap 4.

Клієнт складається з наступних основних модулів: модуль отримання інформації з джерела, модуль опрацювання інформації, модуль візуалізації та модуль комунікації з сервером.

Вхідна інформація може бути отримана з мікрофону у реальному часі, бути завантаженою з файлу формату mp3 чи утворена програмно. Отримання вхідної інформації реалізується за допомогою використання стандартних елементів браузера, які дають можливість отримувати інформацію з мікрофона пристрою; елементів HTML5, які дають змогу завантажувати інформації з файлової системи чи регулювати значення частоти, яке необхідно відтворювати програмним способом.

Приклад коду для зупинки зчитування потоку даних з джерела наведено далі:

```
stop() {
  switch (this._source) {
    case "oscillator":
      this.oscillator.stop();
      break;
    case "microphone":
      this._microphoneStream.getTracks().forEach(function(track) {
        track.stop();
      });
      this._microphone.disconnect();
      break;
    case "file":
      this.audio.pause();
      break;
  }
  window.cancelAnimationFrame(this.drawHandler);
  stopArduino();
}
```

Обробка отриманої інформації базується на використанні технології Web Audio API зі стандартної бібліотеки JavaScript. Одним з основних використаних компонентів є аудіо контекст, який в залежності від джерела інформації використовує відповідний аналізатор за допомогою відповідної функції. Незалежно від джерела дані формують нормалізований масив, який далі використовуються для перетворення Фур'є з використанням віконної функції

Блекмена та згладжування, з описаними раніше параметрами. Також для спрощення обробки даних використовується програмна бібліотека lodash [35].

Візуалізація даних, що оброблюється, відбувається в декількох різних формах, по-перше відбувається візуалізація часової та частотної області у вигляді графіків. Це реалізовано за допомогою використання компоненту canvas та функцій малювання на ньому. Друга форма візуалізації – 3Д візуалізація. Вона відображає графічно, як саме мають формуватися потоки повітря з кожного вентилятора. Цей функціонал реалізовано за допомогою програмної бібліотеки Tree.js. Остання форма візуалізації – візуалізація значень, що надсилаються на кожний з вентиляторів, при цьому ця інформація завжди відображається перед усієї іншою, знаходиться у полі зору та не перекривається. Цей функціонал реалізовано за допомогою стандартних засобів CSS.

Для комунікації з сервером використовується програмна бібліотека jQuery, за допомогою якої виконуються аяx HTTP запити до серверу. Використовується формат для передачі даних – JSON.

Приклад коду для виконання запиту для встановлення зв'язку з Arduino наведено далі:

```
function connect() {
    let config = {
        portName: $("#port").val()
    }

    $.ajax({
        url: "/connect",
        type: "POST",
        contentType: "application/json",
        data: JSON.stringify(config),
        success: function (data) {
            log(data, Level.SUCCESS);
            changeStatus(Status.CONNECTED);
        },
        error: function (xhr) {
            log(xhr.responseText, Level.ERROR);
            changeStatus(Status.DRAFT);
        }
    });
}
```

Робота серверу базується на використанні платформи Node.js та програмної бібліотеки express.

Сервер встановлює зв'язок з кінцевим пристроєм за допомоги бібліотеки `SerialPort` та відкриває його на зчитування та запис. Також сервер виконує пошук кінцевого пристрою зі списку доступних пристроїв та забезпечує виконання усіх необхідних маніпуляцій з пристроєм, що доступні на користувацькому інтерфейсі. З клієнтом відбувається комунікація за протоколом HTTP, на Arduino дані відправляються у байтовому вигляді.

Приклад коду для закриття порту на сервері для комунікації з Arduino наведено далі:

```
function closePort(res) {
  if (PORT.isOpen) {
    PORT.close(function (err) {
      if (err) {
        res.status(400).send('Error closing PORT');
        console.log('Error closing PORT: ', err.message);
      } else {
        res.send('Closed!');
      }
    });
  } else {
    res.send('Port is not open');
  }
}
```

На кінцевому пристрої Arduino Mega 2560 відбувається перевірка порту 9600 на наявність інформації. Приклад коду для зчитування інформації на Arduino наведено далі:

```
void loop() {
  int bytes = Serial.available();
  if (bytes != 0) {
    for (int i = 0; i < bytes; i++) {
      int val = Serial.read();
      if (val != 0) {
        setSpeed(val);
      } else {
        setStartSpeed();
        break;
      }
    }
  } else {
    setStartSpeed();
  }
}
```

Коли інформації була зафіксована, вона зчитується та направляється на подальшу обробку. Конкретно вказано, до яких пінів під'єднані вентилятори та мінімальні значення, з яких вони починають обертання. Ці значення були виявлені

експериментально та становлять: 50, 95, 80, 85, 60. Після чого викликається функція analogWrite, якій передається цифрове значення, яке має бути перетворене у аналогове.

4.4 Користувацький інтерфейс

Користувацький інтерфейс складається з двох основних блоків – панелі конфігурації (цифри 1-5) та панелі візуалізації (цифри 6-7). Панель конфігурації має забарвлення сірого кольору та чіткі рамки, які дозволяють концентруватися саме на цій області при використанні інтерфейсу. Загальний вигляд користувацького інтерфейсу наведено на рисунку 4.4. Деяка інформація візуалізації не є критично важливою, тому при масштабуванні вона зберігається, однак зсувається нижче під панель конфігурації.

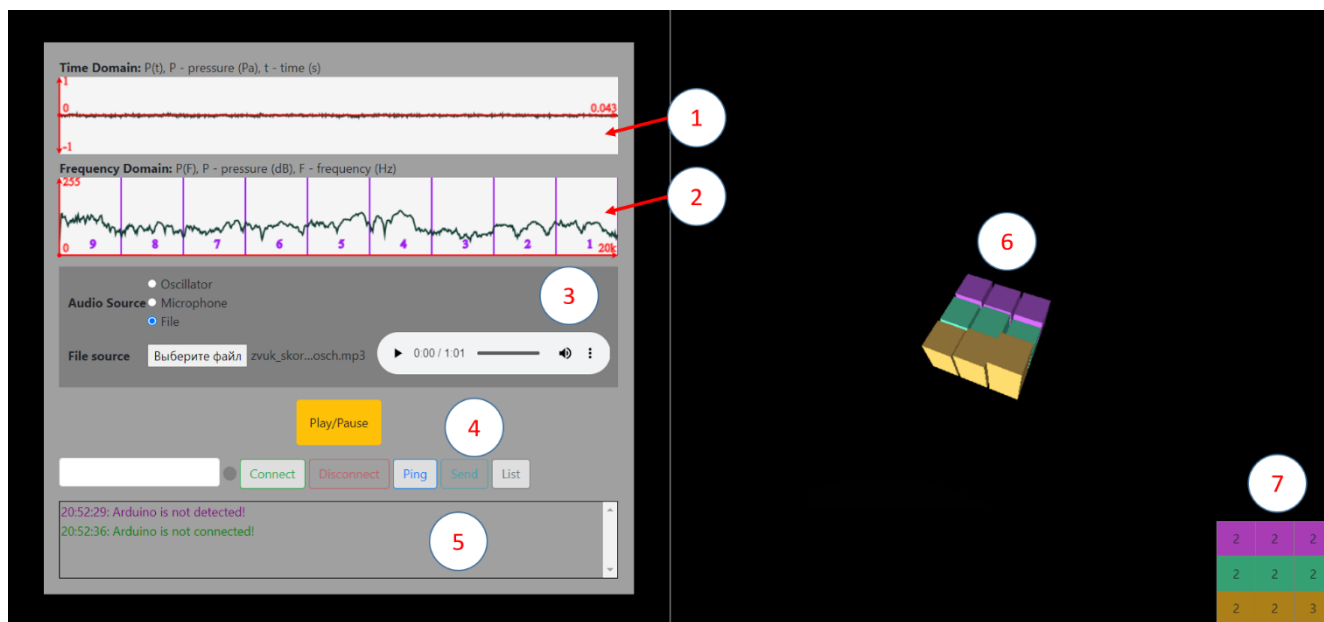


Рисунок 4.4 – Загальний вигляд користувацького інтерфейсу

Панель конфігурації також містить два фрагменти візуалізації – це графік часової області (time domain) – цифра 1 та частотної області (frequency domain) – цифра 2. Візуалізація цих графіків наведена на рисунку 4.5.

Часова область показує амплітуду хвилі в залежності від часу, а частотна – силу звукового тиску в залежності від частоти. Фіолетові вертикальні полоси та цифри показують на діапазони частот, які відповідають конкретному вентилятору.

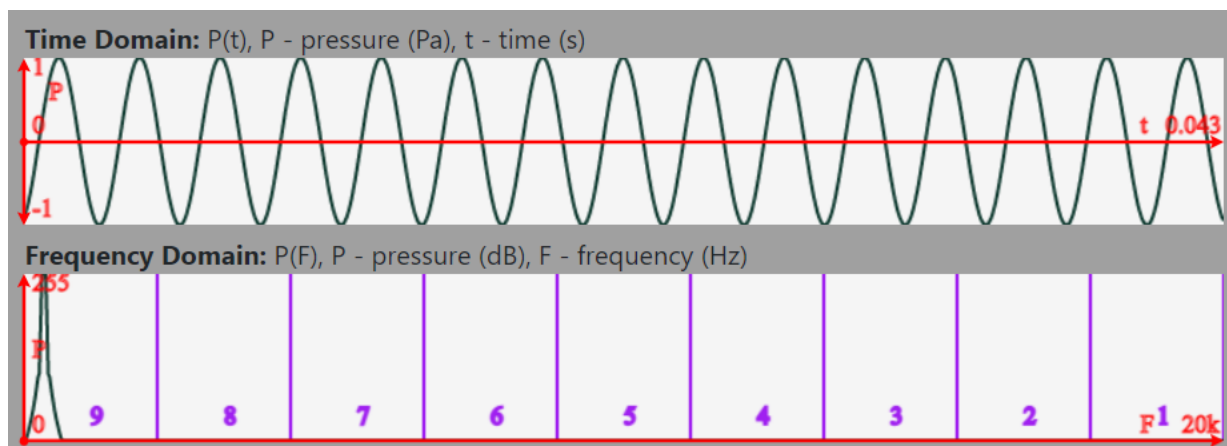


Рисунок 4.5 – Візуалізація часової і частотної областей

Перший власне конфігураційний блок надає можливість вибрати джерело для обробки сигналу. На загальному рисунку позначено цифрою 3. Його візуалізація наведена на рисунку 4.6.

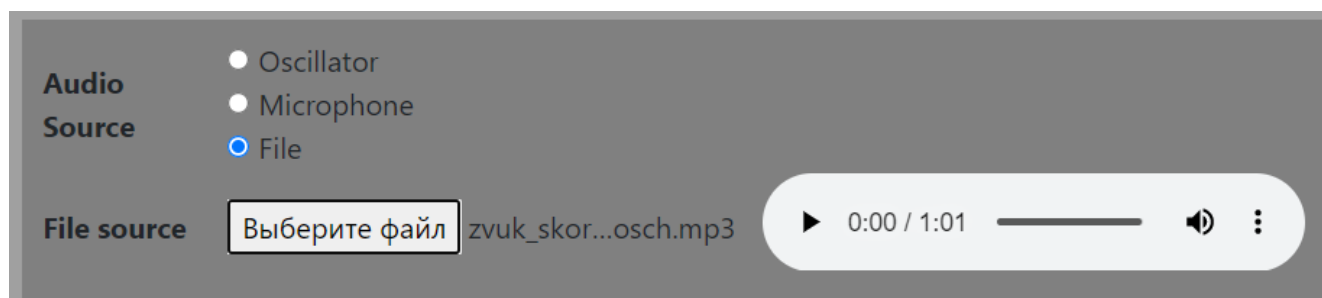


Рисунок 4.6 – Вибір джерела інформації

За допомогою нього можна вибрати один з 3 можливих джерел: генерація сигналу (Oscillator), мікрофон (Microphone) та з файлу (File). Для генерації можна вибрати необхідну частоту та тип хвиль: Sine, Square, Sawtooth, Triangle, в залежності від якого хвилі будуть мати різний вигляд та кількість піків при аналізі. Для мікрофону необхідно дозволити використання мікрофону пристрою для веб-інтерфейсу. Для аналізу інформації з файлу необхідно вибрати файл з комп'ютера,

після чого можна буде переходити на потрібну секунду завантаженого файлу за допомогою стандартного віджету.

Другий конфігураційний блок включає в себе кнопки для управління процесом. На загальному рисунку позначено цифрою 4. Візуалізацію наведено на рисунку 4.7.



Рисунок 4.7 – Елементи для керування

Перша кнопка «Play/Pause» дозволяє починати та призупиняти процес аналізу та відтворення з вибраного джерела.

Текстове поле дозволяє увести назву порту, до якого під'єднано Arduino. За замовчуванням це поле заповнюється автоматично на основі аналізу пристроїв, що підключені до сервера.

Круглий індикатор стану пристрою показує у якому стані знаходиться пристрій: невідомо (сірий круг), під'єднано (зелений круг), від'єднано (червоний круг). При помилці виконання будь-якої операції статус змінюється на «невідомо».

Кнопка «Connect» дозволяє під'єднатися до указанного пристрою, тобто почати прослуховування порту на сервері.

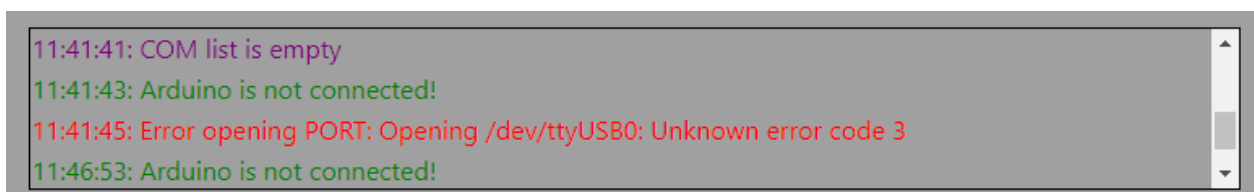
Кнопка «Disconnect» дозволяє закінчити прослуховування порту. За цих умов веб інтерфейс продовжить функціонування у автономному режимі, дані будуть опрацьовуватися, але не будуть відправлятися на пристрій.

Кнопка «Ping» дозволяє перевірити функціонування пристрою. Якщо пристрій був підключений, то ця опція розриває під'єднання та відкриває його знову. Якщо пристрій був відключеним, то відбувається підключення а після цього відразу ж відключення. При цьому статус пристрою не змінюється.

Кнопка «Send» дозволяє відправляти дані на пристрій порціями. Кожний другий раз відправляються дані з максимальним значенням на парні вентилятори, відповідно кожен інший другий раз дані відправляються на непарні вентилятори. Ця опція необхідна для перевірки правильності підключення пристроїв та адекватності їх роботи.

Кнопка «List» дозволяє отримати список підключених до комп'ютера пристроїв. Список відображається у консолі браузера. Ця опція необхідна для самостійного визначення порту пристрою, коли автоматичне визначення не знайшло пристрій.

Останнім блоком на конфігураційній панелі є поле з логами з серверу про виконання операцій. На загальному рисунку позначено цифрою 5. Воно відображає усю необхідну інформацію про перебіг виконання операцій з сервером та на сервері. Містить часову відмітку події та повідомлення. В залежності від типу повідомлення воно має кольорове забарвлення: помилки – червоні, успіх – зелений, попередження – фіолетові і звичайна інформація – сіра. Візуалізація знаходиться на рисунку 4.8.



```
11:41:41: COM list is empty
11:41:43: Arduino is not connected!
11:41:45: Error opening PORT: Opening /dev/ttyUSB0: Unknown error code 3
11:46:53: Arduino is not connected!
```

Рисунок 4.8 – Блок логів

Блок візуалізації містить 2 області з об'єктами – 3Д візуалізацію (цифра 6) та відображення значень, які були відправлені на Arduino (цифра 7).

3Д візуалізація має таку ж кількість стовпчиків як і кількість вентиляторів. Розміщення стовпчиків також відповідає розміщенню вентиляторів. В залежності від значення, що буде відправлено на кінцевий пристрій буде змінюватися висота стовпчика з певним кроком, що відповідає кроку зміни значення, що відправляється. Забарвлення для рядів відрізняється відповідно до частотних

характеристик, описаних раніше. Візуалізацію цього блоку наведено на рисунку 4.9.

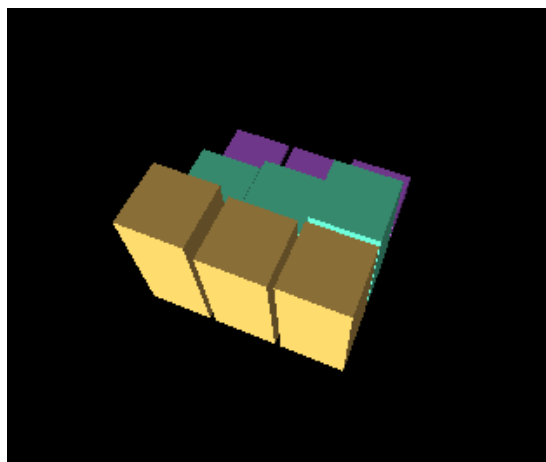


Рисунок 4.9 – 3Д візуалізація

У правому нижньому куті знаходиться візуалізація значень, які були відправлені на кінцевий пристрій. Указані тут значення відповідають висоті стовпчиків з 3Д візуалізації та змінюються синхронно. Візуалізація знаходиться на рисунку 4.10.

0	0	0
1	2	3
4	3	3

Рисунок 4.10 – Блок зі значеннями

Кількість і розміщення комірок відповідає кількості і розміщенню вентиляторів на пристрої. Кольорове забарвлення комірок відповідає кольоровому забарвленню стовпчиків 3Д візуалізації. Цей блок є закріпленим у цьому куті та є напівпрозорим, щоб елементи, які перекриваються ним, були видимими.

4.5 Модуль для програмного розпізнавання

Програмне розпізнавання має сенс у випадку, коли утворений з комплексу сигнал було зафіксовано за допомогою іншого механічного пристрою та виконано процес аналого-цифрового перетворення. Після чого необхідно встановити, який саме звук було передано. Ця можливість не є прямою задачею дослідження, проте може бути корисною для майбутнього застосування.

В клієнтському додатку було створено додатковий функціонал, який під час роботи комплексу записує сформовані значення у файл формату csv перед відправкою на кінцевий пристрій, тобто, відповідно до алгоритму роботи, значення записуються кожні 100 мс та представляють собою числове значення у діапазоні 0-9. Останнім значенням додавався клас звуку. Вигляд даних, які записувалися наведено на рисунку 4.11.

```

1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,chicken
1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,chicken
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,motor
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,2,3,4,motor
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,motor
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,motor
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,2,3,3,motor
1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,motor
2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,motor
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,motor

```

Рисунок 4.11 – Дані для моделі дерева рішень

За допомогою окремого програмного модуля було реалізовано функціонал, який дозволяє зчитати записані значення та виконати навчання моделі дерева

рішень за допомогою алгоритму ID3 для реалізації подальшої можливості класифікації звуку записаного у такому ж вигляді. Використовувалася реалізація алгоритму з програмної бібліотеки decision-tree [36].

Програмний код, пов'язаний з описаним вище функціоналом призначений тільки для проведення експерименту з відмінним від людини користувачем, тому після його проведення він був видалений, однак доступний в репозиторії програмного коду розробленого комплексу.

Дані, які записуються до файлу можна використовувати для подальшого візуального аналізу, наприклад, можна побудувати графік та порівнювати значення для декількох звуків, за допомогою чого можна зрозуміти наскільки звуки схожі між собою. Приклад такого порівняння буде наведено у наступному розділі цієї роботи.

Дерево рішень – один з основних методів для вирішення задачі класифікації. В процесі побудови моделі, алгоритм обчислює ступінь впливу кожного вхідного атрибуту на значення вихідного атрибуту і використовує атрибут, що впливає на вихідний атрибут найбільше, для розбиття вузла дерева рішень. Через умови переходу відбувається виділення значимих атрибутів. Вузол верхнього рівня описує розподілення значень вихідного атрибуту по усій сукупності даних. Кожен наступний рівень описується розподіленням вихідного атрибуту при виконанні умов на вхідні атрибути, що відповідають цьому вузлу. Додавання вузлів відбувається до тих пір, поки не буде досягнута порогова вірогідність того, що вихідне значення буде приймати необхідне значення. Алгоритм має гарні показники по швидкості навчання та роботи, проте внесення змін до уже існуючої моделі може бути складним процесом. Основні алгоритми побудови дерева: ID3, C4.5, CART, MARS [37].

5 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

5.1 Ідентифікація за допомогою комп'ютера

Під час проведення експерименту з використанням функціоналу модуля, описаного у пункті 4.4, було проведено збереження навчальних та тестових даних під час роботи основного алгоритму у відповідні файли. В експерименті перевірялася можливість ідентифікації класів звуків програмною системою. Відповідно до поставленої задачі було вибрано випадковим чином 5 класів звуків. Для кожного з п'яти класів: постріл, звуки з курнику, робота двигуна внутрішнього згорання автомобіля, робота тримеру, гра на музичному інструменті – укулеле, було виконано навчання з використанням 20 файлів тривалістю 5 секунд. Сумарно було сформовано навчальну вибірку розміром 100 екземплярів, кожен з яких представляє собою набір зі 450 числових значення від 0 до 9, у текстовому вигляді дані представляють собою числові значення записані через кому для усього діапазону часу для одного аудіо файлу.

При тестуванні для класів було сформовано таблицю з результатами, де «+» показує правильну ідентифікацію класу звуку, а «-» – неправильну. Отримані результати тестування для класів відображені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати експерименту класифікації звуків

	Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4	Клас 5
Екземпляр 1	-	-	-	-	-
Екземпляр 2	-	-	-	-	-
Екземпляр 3	-	-	-	-	-
Екземпляр 4	-	-	-	-	-
Екземпляр 5	-	-	-	-	-

Тестова вибірка представляла собою значення записані у такому ж вигляді, кількість тестових екземплярів для кожного класу була рівною п'яти.

Було отримано результат експерименту 0%. Отже гіпотеза про можливість розпізнавання відтворених звуків за допомогою програмного забезпечення, працюючого на основі дерева рішень спростовується. За допомогою вибраного дерева рішень та алгоритму ID3 неможливо прогнозувати клас на основі даних, отриманих з програмно-апаратного комплексу, оскільки жоден з екземплярів з тестових даних не був ідентифікований вірно. Збільшувати кількість класів звуків чи змінювати тривалість відповідно до поставленої задачі не мало сенсу, оскільки отриманий результат значно менше 50%.

Оцінка отриманої моделі засобами програмної бібліотеки також показала непридатність моделі до використання. Також було перевірено можливість ідентифікувати моделлю екземпляр з навчальної вибірки, і ця спроба була невдалою.

Можна зробити висновок, що дерево рішень не може знайти правильні залежності між 450 ознаками, які схожі між собою і лежать у діапазоні від 0 до 9. Проте не спростовується загальна можливість ідентифікації класу початкового звуку за допомогою використання програмних систем на основі інших підходів. У майбутніх експериментах необхідно використовувати інший, більш складний, метод та модель даних для виконання такої класифікації, наприклад машинне навчання, яке використовується у раніше згаданих сучасних системах розпізнавання звуків.

5.2 Експеримент з участю людей

Експеримент проводився з участю 5 осіб. Для кожної особи незалежно було проведено інструктаж та навчання. Кожен учасник мав по 2 спроби на кожному з етапів. Експерименти не несли жодної небезпеки учасникам та не задавали шкоди їх здоров'ю. Участь в них була добровільною.

Навчання та проведення експерименту з використанням мікрофону як джерела вхідної інформації, не має сенсу, не дивлячись на те, що розроблений комплекс підтримує таку можливість. Навколишні звуки постійно змінюються та

не можливо двічі відтворити ідентичний звук не штучного походження у реальному житті. Ефективність такого режиму роботи можна вважати такою ж, яка буде отримана під час тестування записаних аудіо файлів, оскільки вони, якраз, представляють собою зафіксовані звуки, в тому числі з фоновими звуками, які можна відтворити багаторазово. У цьому сенсі даний функціонал присутній у розробленому комплексі з метою демонстрації, що це реалізувати можливо, проте у реальному житті необхідно контролювати, які саме звуки надходять на обробку комплексу, чи додатково реалізовувати фільтри шуму та підсилення домінуючих звуків.

Перший етап експерименту представляв собою ознайомлення учасників з можливостями комплексу та навчання. Його метою є запам'ятовування учасниками відповідності між вентиляторами та частотними діапазонами, яким вони відповідають. Для цього використовувався функціонал комплексу для генерації звуків з визначеною частотою. Цей варіант роботи комплексу не несе великого значення для використання у реальних умовах, проте він має велике значення для навчання та ознайомлення з можливостями комплексу.

При такому використанні працював лише один з вентиляторів з максимальною швидкістю. Таким чином на частотній області формувалася лише один пік з максимальним значенням, який розміщувався на конкретному вентиляторі. І така процедура проводилася для усіх вентиляторів по черзі. За допомогою анометра Venetech GM816 фіксувалася відповідність до максимальної швидкості на відстані 2 см – 2 м/с. Людина розміщувала своє лице навпроти вентиляторів і запам'ятовувала, який вентилятор відповідає якому частотному діапазону. Також на цьому етапі було визначено оптимальну відстань, на якій необхідно знаходитися людині для можливості розпізнавання джерела повітряного потоку – 2-7 см при направленні на лице людини. При використанні потужніших вентиляторів ця відстань може бути більшою та комфортнішою для користувача.

При більшому віддаленні людини від вентиляторів повітряні потоки перекриваються і розпізнати їх стає майже неможливо. Зберігається можливість

розпізнавати лише звуки, які формуються з інтервальних піків та затухань. За допомогою запам'ятовування інтервалу та зчитування його з повітряного потоку можна сказати, що був за звук. Приклад таких інтервальних звуків буде наведено далі. Під час проведення навчання на цьому етапі, так само як і на іншому, головні телефони могли бути ввімкненими чи вимкнутими за бажанням учасника, для отримання максимальної ефективності. При цьому було досліджено, що з вимкнутими головними телефонами навчання проходить швидше. В цьому випадку клас звуку оголошується учаснику.

Після навчання було проведено визначення його ефективності шляхом експериментальної перевірки правильності запам'ятовування учасниками відповідності вентиляторів та частотних діапазонів, яким вони відтворюють. На цьому перший етап було завершено і сформовано результати експерименту, які наведено у таблиці 5.2 (де «+» показує правильну відповідь, «-» – неправильну, «В» – вентилятор, «Л» – людина, цифра після «-» – номер спроби).

Таблиця 5.2 – Експеримент з генерованими звуками

	В1	В2	В3	В4	В5	В6	В7	В8	В9
Л1-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Л1-2	+	+	+	+	+	+	-	-	+
Л2-1	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Л2-2	+	+	+	+	+	+	-	+	-
Л3-1	+	+	+	-	-	+	+	+	+
Л3-2	+	+	-	+	+	-	+	-	+
Л4-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Л4-2	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Л5-1	+	-	-	+	+	+	+	+	+
Л5-2	-	+	+	+	+	-	+	+	+

За результатами було виявлено, що середній результат експерименту становить 83,3%, що є позитивним результатом і лише один учасник не подолав

пороговий рівень, набравши 70%, що може вважатися похибкою. Також не було виявлено вентилятор, на якому було б забагато помилок, що виключає будь-які залежності та сторонні фактори. Якщо використовувати 9 реальних звуків, частотна характеристика яких не виходить за робочий діапазон кожного вентилятора, то в цьому випадку гіпотеза була б підтверджена.

Далі відбувався другий етап – експеримент з використанням записаних аудіо файлів. Спочатку передбачалося чітко слідувати кількості, що зазначена у постановці задачі, і було підготовлено перших 15 звуків, однак один з підготовлених звукових файлів був повноцінною музичною композицією і після початкового тестування було з'ясовано, що такий звук сильно контрастує з усіма іншими, які представляють собою прості звуки, тому було вирішити вилучити його з експерименту, зберігши при цьому крок збільшення кількості.

Отже початкова множина кількості звуків для експерименту становила {4, 9, 14} і представляла записані звуки наступних класів: гра на піаніно, вечірнє поле, гра в настільний теніс, електричний тример, двигун внутрішнього згорання автомобіля, постріли з вогнепального пістолету, акапельний жіночий вокал, звуки з курнику, переливання молока в банку зі скла, гра на укулеле, шум автомобільної пробки, свист чайнику, рух потягу, сирена рятувальників ДСНС. Були вибрані такі класи звуків, які можуть бути почуті у реальному житті, та серед яких є як схожі, так і абсолютно не схожі між собою, з різними інтервалами піків та затухань та різного походження, для того щоб зрозуміти, чи є залежність результату від самих класів звуків.

Навчання та тестування складалося з трьох частин – перша для 4 перших аудіо файлів зі списку, друга – для 9 та третя – для усіх 14. Також для кожного з набору аудіо файлів, відповідно до поставленої задачі, було створено 3 версії з тривалістю – 2 секунди, 5 та 10 секунд. Після кожного етапу робився висновок про підтвердження чи спростування гіпотези та приймалося рішення про продовження експерименту. Перед кожною частиною проводилося додаткове навчання, якщо це було необхідно учаснику.

Тестування проводилося для кожної комбінації тривалості та кількості звуків. По черзі у випадковому порядку вмикалися аудіо файли, які відтворювалися розробленим комплексом за допомогою вентиляторів, які взаємодіяли зі шкірою (лицем) людини. Учаснику необхідно було ідентифікувати клас звуку на основі інформації, що він отримує з потоків повітря.

Приклад таблиці з результатами для чотирьох аудіо файлів з тривалістю 2 секунди наведено у таблиці 5.3. Де «+» означає правильну відповідь, «-» – неправильну, «Л» – людина, цифра після «-» – номер спроби.

Таблиця 5.3 – Експеримент з записаними звуками

№ людини	Клас звуку				% - за експериментом
	Піаніно	Поле	Теніс	Тример	
Л1-1	-	-	-	+	25%
Л1-2	-	+	+	+	75%
Л2-1	+	-	+	+	75%
Л2-2	-	+	+	+	75%
Л3-1	-	+	+	+	75%
Л3-2	+	+	+	+	100%
Л4-1	+	-	+	+	75%
Л4-2	+	+	+	+	100%
Л5-1	-	+	-	+	50%
Л5-2	+	-	+	+	75%
% - за записом	50%	60%	80%	100%	72,50%

Подібні таблиці з результатами були сформовані для кожного з 9 проведених експериментів, однак розмістити їх усі у повному обсязі у цій роботі неможливо через їх об'єм.

Далі будуть наведені сформовані підсумки з отриманих результатів. Відсоток правильних відповідей під час проведення усіх експериментів наведено у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати експерименту

Кількість	Тривалість			Середнє значення
	2с	5с	10с	
4 штук	72,50%	82,50%	72,50%	75,83%
9 штук	56,67%	67,78%	60,00%	61,48%
14 штук	25,71%	38,57%	27,86%	30,71%

На графіку, зображеному на рисунку 5.1, проілюстровано залежність правильних ідентифікацій наборів звуків різної кількості від тривалості.

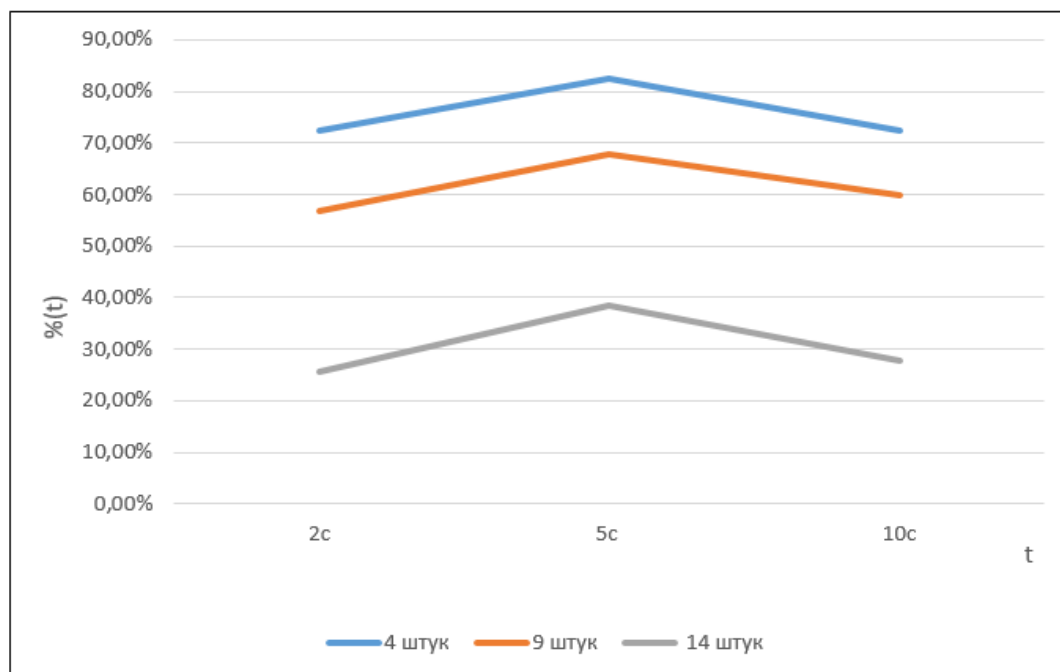


Рисунок 5.1 – Графік правильних ідентифікацій звуків в залежності від тривалості запису

На графіку, зображеному на рисунку 5.2, проілюстровано залежність правильних ідентифікацій звуків різної тривалості від наборів різної кількості.

Графічна інтерпретація дозволяє краще відобразити залежність та зробити прогноз про використання інших можливих комбінацій.

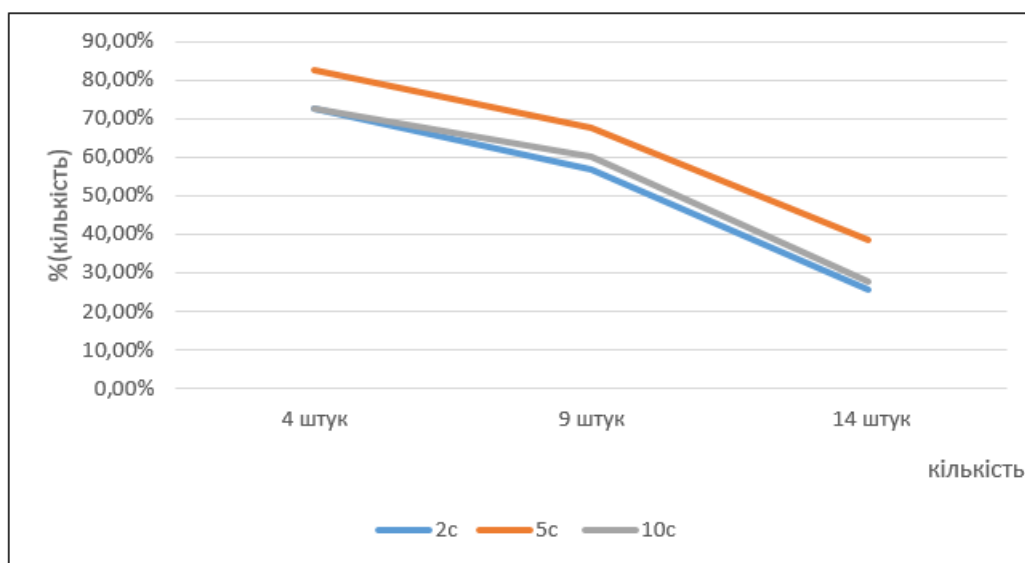


Рисунок 5.2 – Графік правильних ідентифікацій звуків в залежності від кількості файлів

При аналізі результатів було виявлено, що найкращий результат отримано у конфігурації 4 аудіо файли тривалістю 5 секунд, точність становить 82,50%, а для цієї ж кількості файлів для тривалості 2 та 10 секунд – 75,83%. При зменшенні тривалості до 2 секунд результат стає гіршим в середньому на 11,3%, а при збільшенні тривалості до 10 секунд результат стає гіршим в середньому на 9,5%. При збільшенні кількості аудіо файлів до 9 результат стає гіршим в середньому на 14%, а при збільшенні до 14 – на 45,12%. При цьому для 9 аудіо композицій середня точність правильних відповідей становить 61,48%, а для 14 аудіо композицій – 30,71%.

Підсумовуючи отримані результати можна зробити висновок, що гіпотеза підтверджується для невеликої кількості аудіо композицій (4-5) тривалістю близько 5 секунд. Результати для 2 та 10 секунд є близькими до позитивних (72,5%), тому можна вважати, що для цього набору характеристик гіпотеза також підтверджується з поправкою на похибку. Отримуємо, що тривалість для позитивного результату може складати приблизно 3-8 секунд при кількості класів

звуків близько 5. Середній результат для 14 класів звуків становить 30,71%, що менше 50%, тому подальше збільшення кількості класів не відбувалося.

У таблиці 5.5 наведено зведені результати з точністю визначення звуків за його класом.

Таблиця 5.5 – Результати з точністю визначення звуку за класом

Клас звуку	4 файли			9 файлів			14 файлів		
	2 сек	5 сек	10 сек	2 сек	5 сек	10 сек	2 сек	5 сек	10 сек
Авто	-	-	-	40%	60%	30%	20%	20%	30%
Постріл	-	-	-	70%	90%	80%	50%	70%	60%
Вокал	-	-	-	70%	30%	60%	20%	40%	20%
Кури	-	-	-	20%	80%	60%	10%	20%	10%
Молоко	-	-	-	50%	40%	30%	10%	50%	20%
Піаніно	50%	80%	60%	30%	50%	40%	30%	40%	20%
Поле	60%	70%	50%	80%	70%	80%	40%	60%	50%
Теніс	80%	90%	90%	70%	90%	70%	40%	70%	50%
Тример	100%	90%	90%	80%	100%	90%	40%	40%	30%
Укулеле	-	-	-	-	-	-	20%	20%	20%
Пробка	-	-	-	-	-	-	10%	20%	30%
Чайник	-	-	-	-	-	-	20%	20%	10%
Поїзд	-	-	-	-	-	-	10%	20%	10%
Сирена	-	-	-	-	-	-	40%	50%	30%

З цих результатів стає видно, що не всі звуки мають гарний показник ідентифікації навіть при невеликій кількості файлів під час тестування. Наприклад, звуки піаніно та поля при кількості звуків 4 та тривалості 2 та 10 секунд. Також звуки авто, вокалу, курей, молока, піаніно при дослідженнях з кількістю звуків 9. При цьому деякі звуки зберігають гарний відсоток правильних ідентифікацій навіть при проведенні дослідження з використанням 14 звуків – теніс та постріл. А звук тримеру, який демонстрував найкращі результати під час експерименту з 4 та 9

звуками, після того як було додано звуки пробки, чайнику, поїзду, укулеле та сирени перестав нормально ідентифікуватися. Це говорить про те, що деякі звуки, не дивлячись на не схожість їх у реальному житті, мають досить схожий вигляд після відтворенням комплексом і це породжує помилки при ідентифікації людьми. Для прикладу на рисунку 5.3 наведено графік зі значеннями, описаними у пункті 5.1 для звуків тримеру, чайнику та пострілу.

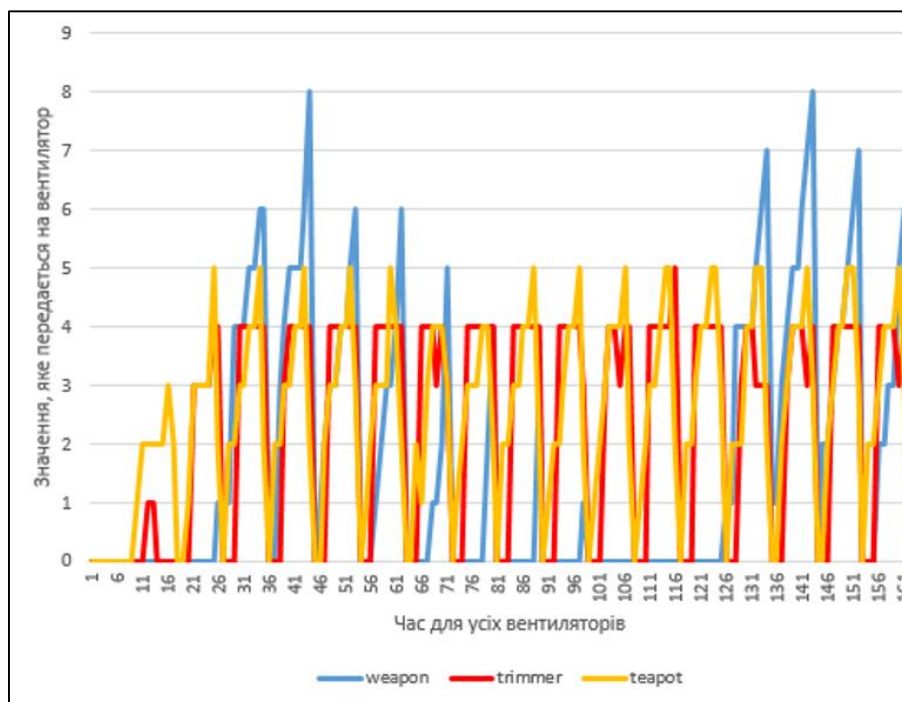


Рисунок 5.3 – Порівняння отриманих значень для різних звуків

На рисунку по абсцисі записані значення часу для усіх вентиляторів, один запис містить інформацію для дев'яти вентиляторів і ці значення записані послідовно по осі, а по осі ординат записане відповідне значення для кожного вентилятора. З рисунку видно, що графік для значень звуку пострілів має форму хвилі з піками та інтервалами тиші, причому піки мають майже максимальне значення. Графіки звуку тримеру та чайнику накладаються майже повністю на усьому проміжку мають дуже схожі значення, відрізняються лише значеннями на одиницю на двох вентиляторах, при тому що звук чайника на запису відрізняється по висоті та ця різниця є гарно помітною. Звуки, які складаються з інтервальних піків та затухань мають найкращі показники та гарно ідентифікуються серед

великої кількості звуків. Вони також мають бути не схожими між собою. Також з рисунка, як і з записаного файлу зі значеннями стає очевидним, що значення для перших двох вентиляторів які відповідають частотним діапазнам 19,53-21,96 кГц та 17,09-19,52 кГц майже завжди дорівнюють нулю, хоча це є очікуваним тому що і в реальному житті звуки такої частоти не є поширеними.

У таблиці 5.6 наведено результати правильних ідентифікацій в залежності від учасника експерименту. Де «Л» – людина, цифра після «-» – номер спроби.

Таблиця 5.6 – Результати з точністю визначення звуку за учасниками

Спроба	4 файли			9 файлів			14 файлів		
	2 сек	5 сек	10 сек	2 сек	5 сек	10 сек	2 сек	5 сек	10 сек
Л1-1	100,00%	75,00%	100,00%	67,00%	55,56%	66,67%	21,43%	28,57%	28,57%
Л1-2	50,00%	75,00%	50,00%	33,00%	66,67%	33,33%	28,57%	35,71%	21,43%
Л2-1	50,00%	50,00%	50,00%	44,00%	77,78%	44,44%	28,57%	50,00%	28,57%
Л2-2	75,00%	100,00%	75,00%	78,00%	66,67%	77,78%	28,57%	42,86%	28,57%
Л3-1	75,00%	100,00%	75,00%	67,00%	44,44%	66,67%	21,43%	35,71%	35,71%
Л3-2	75,00%	100,00%	75,00%	78,00%	88,89%	77,78%	21,43%	35,71%	28,57%
Л4-1	50,00%	75,00%	50,00%	56,00%	66,67%	55,56%	28,57%	42,86%	28,57%
Л4-2	75,00%	75,00%	75,00%	56,00%	88,89%	55,56%	28,57%	35,71%	28,57%
Л5-1	75,00%	100,00%	75,00%	56,00%	55,56%	55,56%	21,43%	42,86%	21,43%
Л5-2	100,00%	75,00%	100,00%	67,00%	66,67%	66,67%	28,57%	35,71%	28,57%

За цими результатами не можна знайти чітку залежність. В більшості випадків друга спроба є трохи кращою за першу. При цьому на момент проведення третьої частини експерименту з 14 звуками, експерименти з меншою кількістю звуків уже були проведені, однак це не допомогло розпізнати звуки, які були краще вивчені.

Підсумовуючи результати можна стверджувати, що після початкового інструктажу та запам'ятовування необхідних комбінацій потоків повітря для кожного звуку таким способом дійсно можна передавати інформацію, однак слід зазначити, що відстань має бути достатньою для ідентифікації вентилятора, з якого

надходить потік повітря. Звісно, такі зовнішні чинники як вітер можуть погіршити результат.

З цього можна зробити висновок, що досліджуваний альтернативним способом дійсно можна вважати дієвим. Він має свої обмеження щодо середовища використання і має уникати зовнішні чинники. Для деяких комбінацій, що досліджувалися, гіпотеза була підтверджена, а для деяких – ні. У майбутніх експериментах необхідно визначити розміри та потужність вентилятора для кінцевого пристрою, при використанні яких вдасться збільшити ефективність використання комплексу та підтвердити гіпотезу для більшої кількості характеристик. Можливо, має сенс ізолювати вентилятори за допомогою перегородок для кращого формування потоку та уникання змішування з сусідніми потоками.

Проте використання такого методу має і інші обмеження, різні звуки можуть мати приблизно однакові частотні характеристики після виконання алгоритму, тому має сенс використовувати цей метод для спеціально вивчених звуків, чи для простих звуків, інтервальних або для звуків, які значно відрізняються між собою під час відтворення.

5.3 Експеримент зі звуками воєнного часу

Зважаючи на війну, що розпочалася в Україні у лютому 2022 року, і беручи до уваги отримані результати у попередньому експерименті, було проведено додатковий експеримент з участю людей. Він проводився таким же чином, як і попередній експеримент. Брала участь ті ж люди, що і у попередньому, отже початкове навчання не проводилося, оскільки вони були ознайомлені з принципами роботи та проведення експерименту [38].

У цьому експерименті перевірялася можливість розпізнавання звуків властивих воєнному часу. Було представлено звуки з 6 класів: проліт літака, проліт вертольоту, тривожна сирена («Сирена1»), тривожна сирена з інтервалами («Сирена2»), сирена швидкої допомоги, обстріл міста з різних типів зброї.

Усі звуки можуть тривають у реальному житті досить довго, однак експеримент передбачає перевірку отримання важливої інформації у короткий проміжок часу, тому усі звуки були тривалість 7-10 секунд. Меншу тривалість неможливо використовувати, оскільки інтервальна сирена має затухання через 5 секунд і необхідно представити хоча б 2 піки. Інші звуки також мали відповідну тривалість.

Результати експерименту наведено у таблиці 5.7. Позначки у таблиці відповідають описаним для інших результатів, назви класів уточнені при перерахунку раніше.

Таблиця 5.7 – Результати експерименту з воєнними звуками

№ людини	Клас звуку						% - за експериментом
	Вертоліт	Літак	Сирена1	Сирена2	Швидка	Обстріл	
Л1-1	+	+	-	+	+	+	83%
Л1-2	+	+	+	+	+	+	100%
Л2-1	+	-	-	+	+	-	50%
Л2-2	+	+	+	+	+	+	100%
Л3-1	+	+	+	+	+	+	100%
Л3-2	+	+	+	+	+	+	100%
Л4-1	+	+	+	-	+	+	83%
Л4-2	+	+	+	-	+	+	83%
Л5-1	+	+	-	-	+	+	67%
Л5-2	+	+	+	+	+	+	100%
% - за записом	100,00%	90,00%	70,00%	70,00%	100,00%	90,00%	86,67%

Загальний відсоток правильних ідентифікацій подолав пороговий рівень. Робимо висновок, що для цього експерименту гіпотеза підтверджується. Результати показали, що для більшості звуків вдалося правильно ідентифікувати клас з вірогідністю 90 або 100 відсотків. Для звуків сирен цей результат гірший, однак майже усі помилки при ідентифікації стосувалися саме типу сирени, а не самого звуку сирени. Тобто якщо вважати ці 2 класи звуків за один – «тривожна сирена», то відсоток правильних ідентифікацій був би на рівні інших класів (90-100%). Такий результат можна пояснити тим, що за 10 секунд у сирені з

затуханнями відбувається лише 1 затухання, яке не досить помітне у зв'язку з невеликою потужністю вентилятора, тому відтворений сигнал можна сплутати з сиреною без інтервалів.

Слід зазначити, що при використанні нечіткого чи приглушеного початкового звуку, який може бути ідентифікованим людиною за допомогою слуху, можуть бути дещо гірші результати при відтворенні за допомогою розробленого комплексу.

В рамках цього дослідження було знайдено можливе практичне застосування способу, що досліджується. Такі комплекси в доопрацьованому не експериментальному вигляді можуть бути розміщені у центрах з людьми, що мають проблеми зі слухом. В тому числі комплекси можуть бути розміщені у бомбосховищах для інформування терміновою та важливою інформацією.

ВИСНОВКИ

У ході виконання даної роботи було досліджено альтернативний спосіб для відтворення звукових хвиль за допомогою вентиляторів, перенесення їх за допомогою потоків повітря та сприйняття людиною за допомогою шкіри. У ході дослідження перевірялася гіпотеза про можливість відтворення та сприйняття людиною звукової інформації, що переноситься за допомогою потоків повітря та впливає на шкіру людини. Для цього було реалізовано апаратно-програмний комплекс для підтвердження теоретичних можливостей та проведення експерименту.

Для реалізації апаратної частини комплексу використовувалася платформа Arduino MEGA 2560 та 9 вентиляторів Delta Electronics ASB0412MA. Для реалізації програмної частини було розроблено алгоритм обробки звукових даних засобами спектроаналізу, перетворення їх на вигляд зрозумілий для кінцевого пристрою та виконання цифро-аналогового перетворення засобами широтно-імпульсної модуляції. Для реалізації використовувалися мова програмування JavaScript, HTML5, CSS3, технологія Node.js та програмний інтерфейс Web Audio API. Розробка програмного забезпечення для Arduino відбувалася з використанням C-подібної мови програмування Arduino.

Проводився експеримент з ідентифікації відтворених комплексом звуків за допомогою програмної системи, що вирішує задачу класифікації на основі дерев рішень та алгоритму ID3. Однак для цього випадку гіпотеза не була підтверджена. Проте є вірогідність, що цю задачу можливо виконати, використовуючи більш складні та досконалі алгоритми для розпізнавання аудіо інформації.

Проведено експеримент з участю людей, в ході якого було визначено, що досліджуваний спосіб може використовуватися для цілей, для яких він був розроблений. Гіпотеза була підтверджена для ряду характеристик початкових звуків і зроблено висновок, що ідентифікувати відтворені звуки можна, якщо їх кількість близька до 5, тривалість складає 3-8 секунд, або кількість і тривалість може бути трохи більшою, проте звуки мають сильно відрізнитися між собою при

відтворенні програмно-апаратним комплексом або бути простими. Адже було досліджено, що краще розпізнаються звуки, які складаються з інтервальних піків та тиші, при цьому велике значення у цьому випадку має саме інтервал між піками. Для ідентифікації звуки мають заздалегідь вивченими, тому що деякі звуки, які не зовсім схожі між собою у реальному житті, відтворюються схожими значеннями на вентиляторах, що робить неможливим їх відрізнити та правильно розпізнати.

Додатково було з'ясовано, що розроблений комплекс та запропонований метод можна використовувати для відтворення звуків воєнної тематики, що може бути корисно для людей з порушеним слухом в надзвичайних ситуаціях.

Критичним для застосування такого способу є також розміщення вентиляторів перед людиною на необхідній відстані, вплив на чутливий орган сенсорної системи людини та відсутність перешкод чи зовнішніх чинників.

Для подальшого використання описаного методу необхідні додаткові апробації та дослідження, які неможливо провести в рамках цієї роботи через часові обмеження. Зокрема, необхідно провести додаткові експерименти та визначити, кількість та розташування вентиляторів, вентилятори якого розміру та потужності необхідно використовувати для досягнення кращої ефективності. Можливо, після цих досліджень вдасться збільшити кількість та тривалість звуків для відтворення чи знайти нові сфери використання.

Є передбачення, що після додаткових експериментів, даний спосіб може мати наступні сфери використання: комерційна сфера, де буде інтегрованим у пристрої, що використовуються у кінотеатрах з впливом на велику кількість рецепторів людини; для доповнення вражень під час проведення концертів наживо; сучасних іграх віртуальної чи доповненої реальності; для індикації інформації, коли це неможливо зробити звичайним способом – за допомогою програвання звуку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Oxenham A. J. How We Hear: The Perception and Neural Coding of Sound // Annual Review of Psychology. 2018. № 69. С. 27-50. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122216-011635>.
2. Слух – общая информация // Здоров! URL: <https://web.archive.org/web/20130112064818/http://www.zdo-rov.ru/sluh-obcschaja-informacija> (дата звернення: 24.01.2022).
3. Ziobroski D., Powers C. Acoustic Terms, Definitions and General Information. URL: https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/resources/reference/ger-4248-acoustic-terms-definitions-general-information.pdf (дата звернення: 25.01.2022).
4. Даниленко С. Д., Русакова Н. Є. Про підхід до розробки методу генерації низькочастотних механічних коливань для програмно-апаратного комплексу дослідження сприйняття звуку людиною // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених та учнівської молоді «Актуальні проблеми розвитку бізнес технологій в сучасних умовах глобалізаційних процесів». 2020. Україна, Харків, «ХАІ». С. 72.
5. Даниленко С. Д., Вечур О. В. Створення цифро-аналогового перетворювача для відтворення звукових хвиль за допомогою програмно-апаратного комплексу // XV Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів. 01-03 грудня 2021. Україна, Харків, НТУ «ХП». С. 116-117.
6. Седокова М.Л., Казіонова Л.Ф., Томова Т. А. Учебное пособие «Возрастная анатомия, физиология и гигиена» // Томский государственный педагогический университет. URL: http://koi.tspu.ru/koi_books/sedokova/6.3.1.htm (дата звернення: 28.01.2022).
7. Звук и его свойства. URL: <https://uchenikspb.ru/kbase/zvuk-i-ego-svoystva> (дата звернення: 30.01.2022).

8. Кузнецов Р. Отличия аналогового звука от цифрового // Хабр. URL: <https://habr.com/ru/company/soundpal/blog/378933> (дата звернения: 02.02.2022).
9. Становой С. Как работает микрофон // Популярная электроника. URL: <http://scsiexplorer.com.ua/index.php/ljudi-i-tehnologii/kak-eto-rabotaet/1332-kak-rabotatet-mikrofon.html> (дата звернения: 06.02.2022).
10. Smelyakov K., Smelyakov S., Chupryna A. Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data. Chapter 1. Adaptive Edge Detection Models and Algorithms. Series Studies in Computational Intelligence (SCI). Publisher Springer, Cham, 2020. Т 876. С. 1-51. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0>.
11. Теорема Котельникова // Национальная библиотека им. Н. Э. Баумана. URL: https://ru.bmstu.wiki/Теорема_Котельникова (дата звернения: 08.02.2022).
12. Аудио-кодирование: секреты раскрыты // Эпифан видео. URL: http://www.epiphan.ru/articles/art_14.php (дата звернения: 10.02.2022).
13. Алдошина И. Основы психоакустики. – Москва: Оборонгиз, 2000. – 151 с.
14. mp3 Разбираемся по порядку // Soundcoder. URL: <http://www.soundcoder.com/stati/kompressory/mp3-razbiraemsiya-po-poryadku> (дата звернения: 13.02.2022).
15. Федотов М. Обзор MP3. Часть I: Что такое MP3? URL: https://www.ixbt.com/multimedia/mp3_new.html (дата звернения: 24.01.2022).
16. Tan L., Jiang J., Digital Signal Processing (Third Edition) – Academic Press, 2018. – 920 с.
17. Pérez-Bellido A., Barnez K. A., Crommett L. E., Yau J. M. Auditory Frequency Representations in Human Somatosensory Cortex // Cereb Cortex. 2017. №28 С. 1–14. doi: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx255>.
18. Frey A.H. Human auditory systems response to modulated electromagnetic energy // J. Appl. Physiol. 1962. doi: <https://doi.org/10.1152/jappl.1962.17.4.689>.
19. Lin Z., Di C., Chen X., Hou Y. Acoustic recognition method in low SNR based on human ear bionics // Applied Acoustics. 2021. №182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.10821>.

20. Vandendriessche J., Wouters N., da Silva B., Lamrini M., Yassin Chkouri M., Touhafi A. Environmental Sound Recognition on Embedded Systems: From FPGAs to TPUs // *Electronics*. 2021. № 10. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10212622>.

21. Proniuk G., Geseleva N., Kyrychenko I., Tereshchenko G. Spatial Interpretation of the Notion of Relation and Its Application in the System of Artificial Intelligence // *COLINS-2019: 3rd International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*, Kharkiv: CEUR Workshop Proceedings, 2019. T. 2362. С. 266-276.

22. Alter D. M. Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller. – Texas: DSP Applications – Semiconductor Group, 2008. – 32 с.

23. Wang Y., Cheng F., Zhou Y., Xu J. Analysis of double-T filter used for PWM circuit to D/A converter // *IEEE 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2012. С. 2752–2756. doi: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2012.6244437>.

24. Волович Г.И. Цифро-аналоговые преобразователи // каф. электротехники ЮУрГУ. URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/dac/index.htm> (дата звернення: 14.02.2022).

25. Arduino. Main. URL: <https://www.arduino.cc> (дата звернення: 15.02.2022).

26. Майоров О. ШИМ сигнал на Arduino. URL: <https://alexgyver.ru/lessons/pwm-signal> (дата звернення: 17.02.2022).

27. Даниленко С. Д., Русакова Н. Є. Методи управління генерацією низькочастотних механічних коливань з використанням програмно-апаратного комплексу // XXV міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». 20 – 22 квітня 2021. Т. 6. С. 169-170.

28. iZotope RX Spectrum Analyzer. URL: <https://telegra.ph/iZotope-RX-Spectrum-Analyzer-10-01> (дата звернення: 18.02.2022).

29. O'Haver T. Harmonic analysis and the Fourier Transform // Department of Chemistry and Biochemistry, The University of Maryland at College Park. URL: <https://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/HarmonicAnalysis.html> (дата звернення: 19.02.2022).

30. Лукин А. Спектроанализатор – что мы на нем видим? // ProSound. URL: <https://prosound.ixbt.com/education/spektr-analys.shtml> (дата звернення: 20.02.2022).
31. Rogers C., Wilson C., Toy R., Adenot P., Choi H. Web Audio API. URL: <https://www.w3.org/TR/2021/REC-webaudio-20210617> (дата звернення: 22.02.2022).
32. Mark Goodyear. Enterprise System Architectures: Building Client Server and Web Based Systems. CRC Press. 2017 – 978 с.
33. Arduino Mega 2560 Rev3 Specification. URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> (дата звернення: 23.02.2022).
34. Delta Electronics ASB0412MA-A Specification. URL: <https://ru.mouser.com/ProductDetail/Delta-Electronics/ASB0412MA-A?qs=IYGu3FyN48cieCF4OvMBgg%3D%3D> (дата звернення: 03.03.2022).
35. Shmuel H. Noise Cancellation using Web Audio API. URL: <https://hila.sh/2019/11/20/airpods.html> (дата звернення: 05.03.2022).
36. Decision Tree for Node.js. URL: <https://www.npmjs.com/package/decision-tree> (дата звернення: 06.03.2022).
37. Черезов Д. С., Тюкачев Н. А. Обзор основных методов классификации и кластеризации данных // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2009. № 2. С. 25-29.
38. Даниленко С. Д., Вечур О. В., Широкопетлева М. С. Експериментальне дослідження альтернативного методу відтворення звукових хвиль // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». 27-28 квітня 2022. Баку, Харків, Жиліна. Том 2. С. 168.