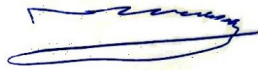


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського"**

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ

Акустичних та мультимедійних електронних систем

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри



Сергій НАЙДА
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ 14 ” червня 2023 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня

«бакалавр»

за спеціальністю

171 "Електроніка"

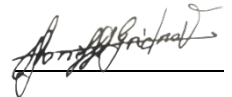
на тему: **"Система моніторингу шуму на базі мікроконтролера"**

Виконав: студент

4

курсу, групи

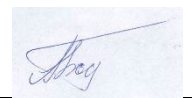
ДГ-91



Гриднєв Данило Андрійович

Керівник

доцент, к.т.н. Богданов О. В.



Рецензент

доцент, к.т.н. Сафронов П. С.



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

Студент



Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 "Електроніка"

Освітньо-професійна програма «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Сергій НАЙДА

«_30_»____05_____2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Гридньова Данила Андрійовича

1. Тема роботи «Система моніторингу шуму на базі мікроконтролера», керівник роботи Богданов Олексій Вікторович, кандидат наук, доцент, затверджені наказом по університету від «_30_»__травня_____2023 р. №__2063-с__
2. Термін подання студентом роботи _____10.06.2023 р. _____
3. Вихідні дані до роботи: система складається з об'єднаних в мережу вимірювальних модулів.

4. Зміст роботи:

- аналіз літератури на тему дескрипторів шуму;
- аналіз літератури на тему регулювання шумового забруднення;
- аналіз нормативних вимог до вимірювального приладу;
- формування структурної та функціональної схеми;
- схемотехнічне проектування вимірювального модуля;
- синтез фільтрів;
- моделювання фільтрів;
- висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

- структурна схема;
- функціональна схема;
- схема електрична принципова вимірювального тракту;
- схема електрична принципова каскаду фільтрів.

6. Дата видачі завдання 15.04.2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літератури на тему дескрипторів шуму;	03.04.23-04.04.23	виконано
2.	Аналіз літератури на тему регулювання шумового забруднення;	05.04.23-07.04.23	виконано
3.	Аналіз нормативних вимог до вимірювального приладу;	08.04.23-11.04.23	виконано
4.	Формування структурної та функціональної схеми;	12.04.23-17.04.23	виконано
5.	Схемотехнічне проектування вимірювального модуля	18.04.23-21.04.23	виконано
6.	Синтез фільтрів	22.05.23-28.05.23	виконано
7.	Моделювання фільтрів	02.05.23-04.05.23	виконано
8.	Висновки	21.05.23-28.05.23	виконано
9.	Оформлення	28.05.23-11.06.23	виконано

Студент

Данило ГРИДНЬОВ

Керівник

Олексій БОГДАНОВ

УДК 621.317; 621.389; 621.396

РЕФЕРАТ

Система моніторингу шуму на базі мікроконтролера// Дипломна робота.

Гриднєв Д.А. «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, група ДГ-91. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023.

Дипломна робота на тему: 54 сторінки, 45 рисунків, 1 таблиця, 8 формул, 48 бібліографічних найменувань.

Об'єктом дослідження: акустичне поле.

Предметом дослідження: моніторинг акустичного забруднення.

Метою роботи є розробка приладу та програмного забезпечення на базі нормативних документів та імплементація додаткових функцій.

Методом дослідження є аналіз літератури за темою, моделювання електричних схем та аналітичний розрахунок.

Результатами роботи є моделі вузлів приладу для вимірювання звукового рівня та передачі даних через мережу від пристрою. Прилад є єдиничною складовою сукупності що формують систему на основі об'єднання за сітчастою топологією в мережу.

Новизна полягає в запропонованих конструктивних рішеннях що дозволяють побудувати прилад що відповідає нормативним документам за нижчою ціною. Об'єднання приладів в мережу дозволить оптимізувати процес вимірювання.

Ключові слова: шумомір, шум, IoT, система моніторингу.

UDC 621.317; 621.389; 621.396

ABSTRACT

A noise monitoring system based on a microcontroller// Diploma thesis. Hrydnyov D.A., National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Electronics, group DG-91. - K.: National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2023.

Thesis on the topic: 54 pages, 45 figures, 1 table, 8 formulas.

The object of research: the acoustic field.

Subject of research: monitoring of acoustic pollution.

The purpose of the work is the development of the device and software based on regulatory documents and the implementation of additional functions.

The research method is the analysis of the literature on the topic, modeling of electrical circuits and analytical calculation.

The results of the work are models of device nodes for measuring the sound level and transmitting data through the network from the device. The device is a single component of the aggregate that forms a system based on the mesh topology of the network.

The novelty lies in the proposed constructive solutions that allow you to build a device that complies with regulatory documents at a lower price. Connecting devices to a network will optimize the measurement process.

Keywords: sound meter, noise, IoT, monitoring system.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	1
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	3
Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ	5
1.1 Визначення цільових параметрів. Суб'єктивні та об'єктивні дескриптори звуку	5
1.2 Класифікація акустичних шумових процесів	9
1.3 Регулювання шумового забруднення	9
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1	12
Розділ 2. АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ТА ФОРМУВАННЯ ВИМОГ	13
2.1 Визначення шумових характеристик	13
2.2 Визначені вимоги до шумоміра згідно зі стандартами	18
2.3 Вибір протоколу передачі даних	19
2.4 Вибір мікроконтролера	21
2.5 Вибір мікрофона	22
2.6 Встановлені вимоги до пристрою	24
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2	26
Розділ 3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ	27
3.1 Принцип роботи, структурна схема	27
3.2 Опорна напруга	29
3.3 Мікрофон та інструментальний підсилювач INA	31
3.4 Схема автономного живлення	34
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3	38

Розділ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРІВ	39
4.1 Аналіз реалізації фільтрів	39
4.2 Розрахунок та аналогове моделювання фільтрів	41
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4	51
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЦП — Аналогово-цифровий перетворювач.

ПЗ — Програмне забезпечення.

АЧХ — Амплітудно-частотна характеристика.

ФНЧ — Фільтр низьких частот.

ФВЧ — Фільтр верхніх частот.

I2C — Inter-Integrated Circuit.

UART/USART — Universal Asynchronous Receiver Transmitter.

BLE — Bluetooth Low Energy.

Рис — Рисунок.

ПК — Персональний комп'ютер.

IoT — Internet of Things.

SPI — Serial Peripheral Interface.

ЕОМ — Електронно-обчислювальна машина.

GPIO — General Purpose Input/Output.

ОП — Операційний підсилювач.

ІП — Інструментальний підсилювач.

МК — Мікроконтролер.

ІМС — Інтегральна мікросхема.

ВСТУП

Шум є одним з найбільш поширених та негативних видів забруднення навколишнього середовища, що впливає на здоров'я та благополуччя людей. Він може спричиняти стрес, порушувати сон, підвищувати ризик різних захворювань, а також знижувати продуктивність та концентрацію уваги. У зв'язку з цим необхідно розробити ефективні та надійні системи моніторингу шуму, які дозволять проводити безперервний вимір, аналіз та контроль рівнів шуму в різних сферах життя: у міському середовищі, на виробничих об'єктах, на робочих місцях, поблизу транспортних магістралей тощо. Сучасний стан технологій у галузі моніторингу шуму пропонує широкий спектр інноваційних рішень. В даний час активно застосовуються цифрові сенсори та датчики, які здатні точно вимірювати рівні шуму в реальному часі та передавати дані для подальшої обробки та аналізу.

Метою дипломної роботи є розробка системи моніторингу шуму що складається з об'єднаних між собою вимірювальних модулів. Кінцевий модуль повинен забезпечувати точні та надійні вимірювання рівня звукового тиску та передавати дані по бездротовій технології, без залучення оператора на місцевості. Для досягнення поставлених цілей у роботі будуть розглянуті основні принципи вимірювання шуму, модель поширення хвиль, бездротові технології передачі даних, основні дескриптори шумових процесів, нормативні документи що регулюють шумове забруднення та вимоги до вимірювальних приладів. На базі аналізу формуються кінцеві вимоги до пристрою, реалізується структурна та функціональна схеми, проводиться підбір компонентів та виконується схемотехнічне рішення з відповідними розрахунками та моделюванням.

Результати цієї роботи можуть бути використані в подальшому розвитку, конструюванні подібних систем моніторингу акустичних параметрів. Дані рішення мають практичну значущість для будівельної галузі, промислового виробництва та муніципалітетів, моніторингу екологічного стану довкілля.

Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

1.1 Визначення цільових параметрів. Суб'єктивні та об'єктивні дескриптори звуку

Для того, щоб підвести до дескрипторів, що описують шумовий процес, треба окреслити загальний аналітичний апарат опису і дослідження звуку. Оскільки звук є різновидом механічних коливань, для опису даних явищ застосовуються параметри спільні для всіх коливальних процесів. Для коливань характерно перетворення одного виду енергії на інший – кінетичної на потенційну, магнітної на електричну та і т.д. Коливальним рухом називаються процеси, що відрізняються тим чи іншим ступенем повторюваності в часі. Природа пружних коливань описується та може бути досліджена заданим математичним модулем акустичного середовища та використанням відповідних рівнянь, що детермінують її характеристики [1-2, 3].

Модель будується на трьох припущеннях, а саме: 1) середовище вважається суцільним та характеризується щільністю $\rho(r, t), \text{кг/м}^3$; 2) середовище є ідеально-стисненим, це означає, що за умови прикладання сили змінюється об'єм, але при знятті навантаження об'єм повертається до початкового стану; характеристикою даного процесу є тиск, що може бути в момент стиснення від'ємним, та, навпаки, позитивним у момент розтиснення; 3) середовище не проводить теплоту, при зміні тиску не відбувається теплообмінних процесів. Представлена вище модель називається ідеальним акустичним середовищем, вона не враховує такий важливий аспект в практичних задачах як поглинання хвиль, і в цілому не дозволяє розглядати ряд акустичних процесів [1-2, 3].

Далі, для того, щоб вивести хвильове рівняння, яке в свою чергу описує поширення хвилі в середовищі, зміну її в часі та як вона розподіляється в середовищі, треба визначити закономірності руху середовища. Оскільки на середовище діє навантаження стиснення та розтиснення, можна розділити його на малі елементарні

гранули та уявити що тиск припадає на неї, отже, даний процес руху гранули може бути описаний другим законом Ньютона. Другою складовою є те, що гранули не можуть рухатися довільно та зберігають форму об'єму. Завершальним допущенням є те, що теплообмін відбувається по адіабатичному закону. Отримавши три характеристики можна описати їх рівняннями, одним векторним і двома скалярними [1-2, 3]:

- Коливальна швидкість частинки $v(v_x, v_y, v_z)$;
- Акустичний тиск p ;
- Змінний тиск середовища $p_{\sim}$.

Кожен з цих параметрів має своє рівняння, які для зручності представляються в формі одного диференційного рівняння. Воно називається хвильовим рівнянням для даної функції, та має у своєму складі похідні другого порядку за часом та координатами [1-2, 3].

Для опису шумових процесів ми використовуємо енергетичні показники, акустична енергія це частина повної енергії середовища, у якому виникають хвилі, дані параметри залежать від обраної моделі. До параметрів, які найчастіше використовуються при оцінці та вимірюваннях шумових характеристик, відносять: інтенсивність звуку, звукову потужність, частотний спектр. Розглянемо їх фізичний зміст більш детально [1-2, 3].

Виділивши певну площину X в середовищі, де розповсюджується хвиля, енергія, що переноситься хвилею може бути визначена як робота, яку виконує частинка що рухається, яка в свою чергу знаходиться зліва від X до частинок, що знаходяться справа. При розгляданні гармонійних хвиль використовується середня за період потужність, що називається інтенсивністю:

$$I = \frac{P^2}{\rho c}, \quad \text{Вт/м}^2 \quad (1.1.1)$$

Дана формула приведена для вільного звукового поля і змінюється для дифузного. Щільність звукової енергії виражає енергію в одиниці об'єму. В акустиці для зручності основні величини представляють в децибелах, інтенсивність звуку, щільність енергії, звукову потужність та тиск [1-2, 3].

Рівень інтенсивності звуку вираховується як:

$$L_i = 10 \lg (I / I_0), \quad (1.1.2)$$

, де $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$, пороговий рівень що відповідає порогу гучності, рівень інтенсивності може бути виражено через звуковий тиск як:

$$L_i = 20 \lg (p / p_0). \quad (1.1.3)$$

Дану величину називають рівнем звукового тиску і як порогова величина приймається $p_0 = 2 * 10^{-5} \text{ Н/м}^2$, що відповідає I_0 . Таким чином, ввівши порогові значення для інтенсивності та тиску одиниця, децибел набуває абсолютного значення [1-2, 3].

Регулювання акустичних вимірювань та вимог до апаратури визначено в стандартах. Необхідно перейти від об'єктивних до суб'єктивних величин.

Слуховий апарат людини чутливий до сигналу малої та великої інтенсивності, що еквівалентно діапазону в 120 дБ, хвилі з більшою інтенсивністю спричиняють у людини суб'єктивний ефект того, що даний звук гучний і навпаки. Не кожен рівень тиску сприймається як звук, рівень тиску після якого виникає слухове відчуття називається порогом гучності. Ключовим поняттям є те, що всі чутні звуки лежать в діапазоні між порогом відчуття та больовим порогом. Від понять про діапазон перейдемо до рівня гучності як до міри, що характеризує відчуття від певного рівня акустичного тиску [4, 5, 8, 9].

Рівень гучності визначається як рівень звукового тиску синусоїдального тону в 1 кГц, що має рівногучний розподіл та вимірюється в фонах. Людське вухо не однаково реагує на звуки різної частоти; ми схильні сприймати звуки з нижчою частотою як такі, що мають нижчу інтенсивність. Виходячи з цієї обставини експериментально було встановлено криву частотної характеристики з фільтрацію ФНЧ та ФВЧ.

У шумомірах імплементуються коригувальні фільтри на базі кривих Флетчера-Менсона, для забезпечення більш точного результату вимірювання та імітації сприйняття звуку людиною. Дані криві використовуються в більшості стандартах, де кожна застосовується для певного типу шуму: автомобільного, авіаційного, залізничного, імпульсного та високого рівня. Приводяться октавні середні частоти та поправки до них, сигнал розкладається по октавних смугах від 31.5 Гц до 8 кГц. Коригувальні характеристики А, В, С, D представлені на Рис.1 [4, 5, 8, 9].

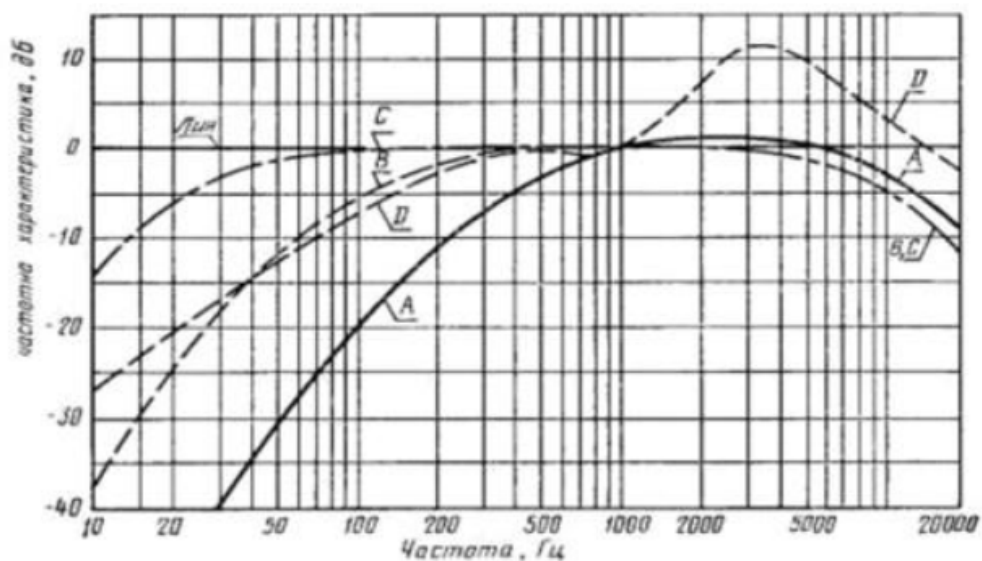


Рисунок 1.1.1 — Коригувальні характеристики рівнів шуму

1.2 Класифікація акустичних шумових процесів

Шумовий процес класифікуються за джерелом виникнення, спектральними та часовими характеристиками. В прийнятих стандартах шумове забруднення класифікують за джерелом виникнення на [4, 5, 8, 9]:

- техногенні внутрішні, до яких відносять різного роду устаткування;
- техногенні зовнішні: автомагістралі, залізниці, водні шляхи, підстанції;
- біогенні зовнішні: концерти, мітинги, базари, будмайданчики.

У документах зазначається детальна класифікація найпоширеніших типів джерел шуму з приведеними формулами для розрахунку рівнів звуку:

За характером спектра:

- широкосмуговий;
- тональний.

За часовими характеристиками:

- постійний (незмінний впродовж від 8 годин);
- непостійний.

За тривалістю непостійний шум також розподіляють на:

- імпульсний;
- коливальний;
- уривчастий.

1.3 Регулювання шумового забруднення

В українському законодавстві регуляція шумового забруднення підпадає під закон «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [29].

У законі окреслений основний термінологічний апарат, однак немає пропрацьованого процесу контролю, постійного моніторингу шумового забруднення. У ньому помітний акцент ставлять та походженні шуму (будівельні заходи). Окрім того, немає чітко окресленої відповідальності за порушення та, власне, що можна вважати таким (окрім будівельних заходів).

Процедуру вимірювання рівня шуму, що розглядають як складову будівельного процесу, регулюють законом про стандартизацію. У ньому передбачено поняття стандартів як нормативних документів, у яких зазначається термінологія, процедури, дані, методи розрахунку та вимоги до метрологічних процедур, приладів тощо. Майже всі стандарти є обов'язковими до виконання, деякі з них можуть мати рекомендаційний характер [27, 28].

Чинне законодавство не передбачає концепцію постійного моніторингу та управління забруднення задля покращення умов життя. Це є недоліком українського законодавства і має бути стимулом для відповідного подальшого законотворчого процесу. Також відсутній доступ до інформації у громадян, на відміну, від країн ЄС.

У ЄС директивою ЄС 2002/49/ЕС встановлено цілі виведення методів для зменшення шкідливого впливу шуму з окремим виділенням положень про вплив на тривожність та загальний психологічний стан людей. У документі встановлюється поняття візуалізації впливу забруднення у формі мап шуму, обов'язковість виконавчої влади у впровадженні дій для зменшення впливу відносно даної інформації та її доступність громадськості, визначення і впровадження спеціалізованих критеріїв оцінки шумового забруднення. Важливим уточненням в даній директиві є те, що шумові карти повинні складатися компетентними органами для всіх автомагістралей, залізничних шляхів, аеропортів та всіх міських агломерацій з населенням понад 250 000 людей. До того ж, усі шумові карти та дані про екологічний стан середовища повинні бути у відкритому доступі [17, 18, 19, 26].

В Україні шумове забруднення регулюється стандартами:

- ГОСТ 22283—2014 (Допустимі рівні шуму на території житлової забудови);
- ГОСТ 23337-78 (Шум.Методи вимірювання);
- ГОСТ 12.1.003 (Система стандартів безпеки праці);
- ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 (Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій);
- ДБН В.1.1-31:2013 (Захист територій, будинків і споруд від шуму).

А також діють наступні стандарти про шумомір та його компоненти:

- ГОСТ 30804.4.2—2013 (Стійкість до електронних розрядів);
- ГОСТ 17187—2010 (Шумоміри);
- ГОСТ 17168—82 (Фільтри електронні, октані та третьоктавні).

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

У цьому розділі було приведено основну фізичну модель для дослідження процесу розповсюдження звукових коливань та виведення основних їх параметрів, окреслено загальний аналітичний апарат опису та дослідження звуку, було виведено абсолютні та відносні величини, встановлено зв'язок з суб'єктивними параметрами. Приведено поняття коригувальних кривих рівнів в шумомірах, сприйняття гучності людиною.

Була спроба дослідити різницю в регулюванні шумового забруднення у законодавстві України та ЄС. При їхньому порівнянні були виявлені суттєві відмінності. У вітчизняному регулюванні даного питання бракує концептуалізації проблеми (поза шумовим забрудненням як частиною будівельних заходів), закріпленої на законодавчому рівні в Україні. Це проявлено у відсутності постійного моніторингу та спеціалізованих критеріїв оцінки, недоступність інформації для громадян та ігнорування негативного впливу на психіку людини. Встановлено основні нормативні документи, що регулюють шумове забруднення та технічні параметри шумомірів.

Це буде застосовано в подальшому аналізі нормативної документації, котра уможливилює реалізацію проектування приладу. Також було наведено класифікацію шумових процесів за основними характеристиками (джерелом виникнення, спектральними та часовими характеристиками).

Розділ 2. АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ ТА ФОРМУВАННЯ ВИМОГ

2.1 Визначення шумових характеристик

У стандартах встановлюються правила розрахунку рівнів звуку на території від найпоширеніших джерел шуму. Згідно з документом [24, 25] основними джерелами зовнішнього шуму в міських та сільських поселеннях є транспортні потоки, підприємства, транспортні підприємства та локальні джерела. Перелічені джерела шуму визначаються еквівалентним та максимальним рівнем звуку, які визначаються вимірювальним обладнанням або шляхом розрахунку.

Вимірювання як процес це отримання певних значень та порівняння їх з прийнятою величиною виміру, що відбувається за допомогою вимірювальної апаратури. Вимірювальна апаратура реалізує певний вимірювальний тракт, найбільш поширеним на практиці є використання вимірювальних мікрофонів. Він підходить для тих чи інших відносних вимірів, а також після процедури градування методами диска Релея чи методом взаємності може бути використаний для абсолютних вимірів. На об'єктивність вимірювання впливає розмір мікрофона, акустичний опір, частотна характеристика [4, 5, 7]. Вимірюваний тракт на базі шумоміру зображено на Рис. 2.1.1.

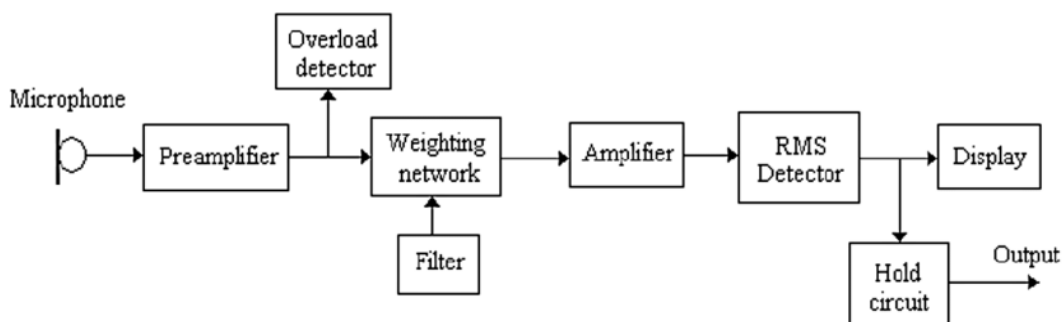


Рисунок 2.1.1 — Структурна схема шумоміра

На практиці вимірювальні результати порівнюються з аналітичним розрахунками та змодельованим вимірювальним простором в спеціалізованому ПО.

Найбільш вживаною моделлю акустичного поля від випромінювача є пульсуюча сфера, що випромінює сферичні хвилі. Інтенсивність таким чином виражається як:

$$J = \frac{P_A}{4\pi r^2} = \frac{P_A}{S}, \quad (2.1.1)$$

де відповідно визначені площа, радіус до поверхні, акустична потужність.

Оскільки в ближньому полі поширення хвиль може не синхронізуватись з коливаннями частинок, в ситуації, коли відстань від джерела мала, і можуть виникати фазові зсуви, затримки, призведені перевідбиттями у вільному полі використовується дальня зона. В дальній зоні звук поширюється без впливу перешкод. І, навпаки, в закритому приміщенні з перелічених вище причин (перевідбиттів) створюється така ситуація що направлений звуковий тиск в точках приміщення різний, порушується його ізотропність. На кількість перевідбиттів впливає звукопоглинальні властивості матеріалів, геометрія приміщення.

Умови вимірювання: у вільному просторі, обмеженому, чи дифузному мають ключове значення при інтерпретації кінцевих результатів експерименту, та його організації в цілому.

Рівень потужності визначається як:

$$L_p = 10 \lg \frac{J}{p_0} + 10 \lg S, \quad (2.1.2)$$

S - поверхня у дальньому полі. Розглянемо апроксимацію вимірювання у вільному полі. В дальньому полі вираження потужності відбувається через значення звукового тиску в точці

$$I(at\ r) = \frac{p_{rms}^2(r)}{\rho c} \quad (2.1.3)$$

ρc - характеризує опір повітря в нормальних умовах, p_{rms}^2 — середньоквадратичний звуковий тиск в точці з радіусом r .

Якщо навколо джерела розташована замкнута вимірювальна поверхня, так що всі точки на поверхні знаходяться в дальньому полі, і якщо припустити, що вектор інтенсивності по суті є нормальним до поверхні, так що $I = I_n$ у всіх точках на поверхні, тоді:

$$W = \frac{1}{\rho c} \sum_i p_i^2 S_i, \quad (2.1.4)$$

p_i - середньоквадратичний звуковий тиск на площині (сегменті) S_i . Тоді, рівень звукової потужності якщо всі сегменти рівні:

$$W = \frac{S}{\rho c} \frac{1}{N} \sum_i p_i^2 = \frac{S}{\rho c} (p^2), \quad (2.1.5)$$

де S - загальна площа вимірювальної поверхні, N - кількість сегментів поверхні, p^2 - середньоквадратичний тиск по всій вимірювальній поверхні. В логарифмічній формі при еталонній потужності $10^{-12}W$ та тиску в $20\ \mu Pa$, рівень звукової потужності:

$$L_W = L_p + 10 \log \frac{S}{S_0} + 10 \log \frac{400}{\rho c}. \quad (2.1.6)$$

Для проведення вимірювання потрібно підібрати вимірювальну поверхню відносно геометрії випромінювача. Для точкових джерел сферична або напівсферична поверхні є оптимальними. Машини мають зазвичай форму паралелепіпеда, одже для вимірювань потрібно обрати поверхню такої ж форми.

Якщо висота значно більша за довжину та глибину — обирається циліндрична форма. [4,5,7]. Приведемо деякі схеми розташування точок з нормативної документації. Поверхня вимірювання розбивається на п'ять площин та ділять на ділянки по вимірювальній відстані.

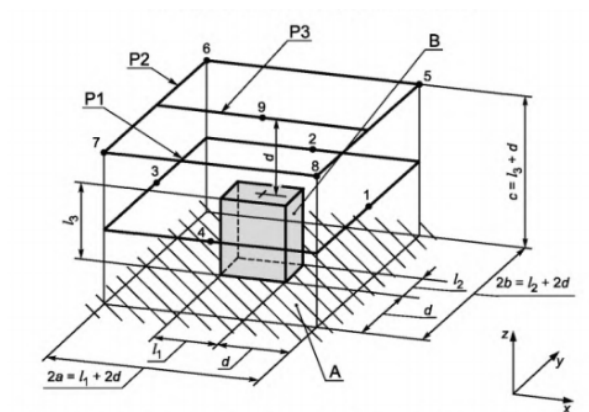


Рисунок 2.1.3 — Точки розташування на поверхні в формі паралелепіпеда малих джерел шуму

Точками показані місця розташування мікрофонів, Р буквами позначені траєкторії сканування. Штриховою — звуковідбиваюча поверхня, даний метод також може мати вигляд (Рис. 2.1.3, Рис. 2.1.4).

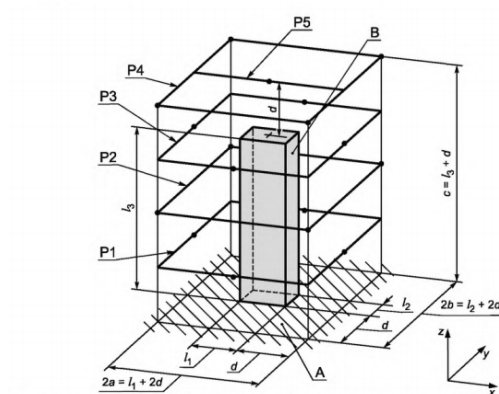


Рисунок 2.1.4 — Точки розташування на поверхні в формі паралелепіпеда великих джерел шуму

Для напівсферичної площини (Рис. 2.1.5, Рис. 2.1.6, Рис. 2.1.7) :

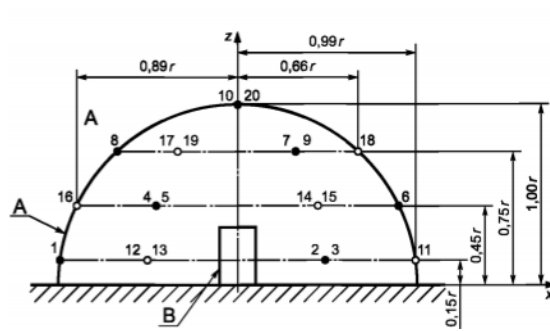


Рисунок 2.1.5 — Точки розташування на напівсферичній поверхні

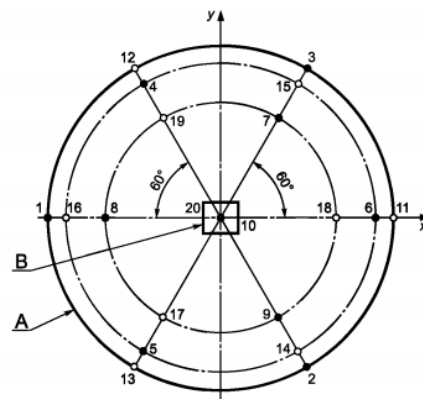


Рисунок 2.1.6 — Точки розташування на напівсферичній поверхні, вид зверху

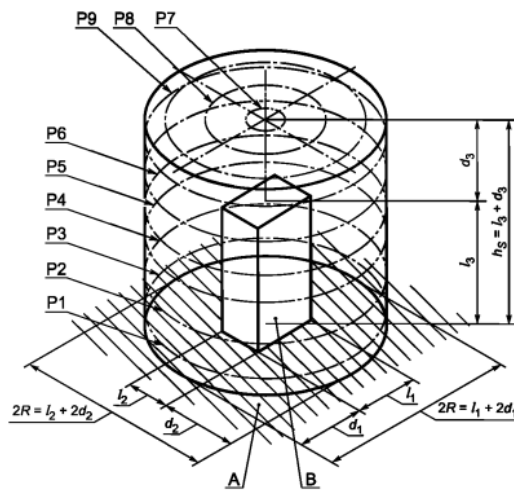


Рисунок 2.1.7 — Точки розташування на циліндричній поверхні

2.2 Визначені вимоги до шумоміра згідно зі стандартами

Проектування вимірювального модулю потребує дослідження нормативних документів, стандартів де зазначаються технічні характеристики яким повинен відповідати вимірювальний прилад. Приведемо основні з них. Вимірювальні прилади підрозділяють на класи:

- Нульовий — зразкові вимірювання;
- Перший — натурні виміри високої точності;
- Другий — натурні виміри нормальної точності;
- Третій — орієнтовні вимірювання.

Виведення отриманих даних повинно бути в децибелах щодо опорного звукового тиску у $20 \mu Pa$. В стандарті вказані діапазони вимірювальних частот, яким повинні відповідати класи пристроїв, а саме:

- від 20 до 12.5 кГц — 0 та 1-ий класи;
- від 20 до 8 кГц — 2 клас;
- від 31.5 до 8 кГц — 3 клас.

Частотна характеристика шумоміра повинна мати вигляд кривої А (Рис. 1.1.1, див. стор. 8), що досягається фільтрацією. Також можливо додатково забезпечити для різних методів виміру криві виду В, С, D [15].

Окрім частотної характеристики шумоміри повинні мати режими зі змінною часовою характеристикою, а саме: F (швидко), S (повільно), I (імпульс). Імпульсний режим повинен мати один з під режимів – швидкий, чи повільний [15].

Для кожного з класів повинна виконуватись похибка градуювання на опорній частоті та рівні звуку у вільному полі в межах:

- 0.4 дБ — нульовий клас;
- 0.7 дБ — перший клас;

- 1 дБ — другий клас;
- 1.5 дБ — третій клас.

Спотворення на виході, змінюючи вхідний сигнал у відгуку системи, не повинні перевищувати 1 дБ. Встановлюється гранична частота, від якої залежить рівень перевищення. Окрім цього, у шумомірі має бути реалізовано функціонал для зміни розміру вибірки, що в свою чергу потрапляє далі на нормувальний каскад фільтрів.

2.3 Вибір протоколу передачі даних

Основні параметри які треба враховувати при виборі протоколу передачі даних це: можливість створення мережі, відкритість технології, наявність відкритих бібліотек, наявність на ринку, сумісність з іншими приладами. Обраний протокол передачі визначає кінцевий прилад. На ринку плати розробників можуть мати встановлений модуль, антену, тої чи іншої технології. Або модуль підключається окремо через протоколи UART/USART, I2C.

Виділимо основні наявні рішення та оберемо оптимальний варіант для модуля вимірювання шуму:

- Wi-Fi (бездротова локальна мережа) є одним з найпоширеніших протоколів передачі даних у бездротових мережах. Мікроконтролери з підтримкою Wi-Fi можуть підключатися до Інтернету та обмінюватися даними з віддаленими серверами, хмарними сервісами та іншими пристроям. Мікроконтролери з чіпом Wi-Fi;
- BLE – це бездротовий протокол передачі даних, який зазвичай використовується для підключення пристроїв у безпосередній близькості один від одного. Мікроконтролери з підтримкою Bluetooth можуть обмінюватися даними зі смартфонами, та іншими пристроями, що підтримують Bluetooth;
- Zigbee – це протокол, розроблений для бездротових мереж низького енергоспоживання та низької швидкості передачі даних. Він часто

- використовується в системах розумного будинку та індустріальних додатках; Мікроконтролери із підтримкою Zigbee можуть взаємодіяти з іншими пристроями, що підтримують цей протокол, для передачі даних та управління;
- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) – це протокол, призначений передачі даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Він часто використовується в IoT-системах, де мікроконтролери надсилають дані на віддалені сервери через LoRaWAN-шлюзи;
 - NB-IoT (Narrowband Internet of Things) – це стандарт комунікації передачі даних у вузькосмугових мережах IoT. Він надає низьку швидкість передачі даних і низьке енергоспоживання, що особливо підходить для систем з обмеженою енергією.

Оскільки необхідно щоб кінцеві прилади могли бути об'єднані в мережу зв'язу коло до BLE, Zigbee та LoRaWAN. Також приведені технології не потребують додаткових вузлів для підключення до користувацьких пристроїв (ПК, смартфони).

Zigbee оптимізовано для низького енергоспоживання, що забезпечує тривалий час роботи на батарейках або інших джерелах живлення. Це робить його ідеальним вибором для IoT пристроїв, які повинні працювати довгий час без заміни батарей. Також забезпечується хороша дальність передачі, що дозволяє будувати мережі з широким покриттям. В Zigbee забезпечується підтримка MESH архітектури, де кожен пристрій може бути ретранслятором даних інших пристроїв. Це підвищує надійність та розширюваність мережі, дозволяючи пристроям передавати дані через кілька проміжних вузлів. Якщо один пристрій виходить з ладу або поза зоною дії, дані можуть бути перенаправлені через інші вузли в мережі.

BLE має ідентичні властивості, основною відмінністю є більша гнучкість поєднання з користувацькими пристроями. Система на базі BLE та сітчастої топології дозволяє отримувати дані про стан кожного датчику підключенням до найближчого.

В такому випадку кінцева система залишається стійкою до того що певний вузол вийде з ладу.

2.4 Вибір мікроконтролера

Обравши BLE як протокол передачі даних розглянемо наявні на ринку рішення. Модуль BLE може знаходитись на кристалі мікроконтролера, інтегрований в саму мікросхему, або як окремий модуль, який підключається до мікроконтролера через інтерфейси, наприклад UART або SPI. Найпопулярнішими рішеннями з інтегрованим модулем в мікросхему є (Табл.2.4.1) :

Таблиця 2.4.1 - BLE мікроконтролери

Виробник	Чіп
Nordic Semiconductor	nRF52832
Texas Instruments	CC2640
Silicon Labs	EFR32BG13

В цілому вони мають майже ідентичні, відрізняються можливістю роботою з периферією та потужностями обчислювального ядра. Окрім бездротового модуля плата розробника повинна бути оснащена потужним АЦП, адже сигнал з вимірювального мікрофона поступає в аналоговому вигляді. АЦП здійснює операцію квантування та дискретизації. Квантування означає що сигнал округляється до певного рівня у фіксований момент часу, дискретизація – вимірювання сигнали в дискрети часу. Головним параметром АЦП є частота дискретизації що характеризує частоти взяття відліків сигналу при його дискретизації. Також критерій який важливо враховувати є діапазон вхідного сигналу – мінімальне та максимальне значення напруги при якому АЦП працює справно.

Відповідно до теореми Котельникова (теоремі Найквіста-Шеннона), для точного відновлення безперервного сигналу з його дискретних відліків, частота дискретизації повинна бути не менше ніж удвічі вищою за максимальну частоту сигналу. Оскільки максимальна частота вхідного сигналу від мікрофона дорівнює 20 000 Гц, для достатнього відновлення цього сигналу, частота дискретизації повинна бути не менше ніж у два рази вище. Таким чином, мінімальна частота дискретизації має бути 40000 Гц або вище. Всі перелічені моделі мають чіпів достатню частоту дискретизації АЦП.

Оскільки параметри BLE та АЦП ідентичні у всіх перелічених моделях, кінцевий вибір робиться на користь Nordic Semiconductor nRF52832. Чіп має бібліотеки високого рівня абстракцій для роботи - Software dewelopment kit, що надає значну перевагу даному чіпу відносно конкурентів.

2.5 Вибір мікрофона

Основним параметром для вибору мікрофона є чутливість. Чутливість – відношення напруги на виході до звукового тиску в точці, що діє на мікрофон. Чутливість встановлюється в режимі холостого ходу або номінальному навантаженні. Також зазначається чутливість відносно впливу на мікрофон у вільному чи дифузному звукових полях. Рівень чутливості виражається в децибелах, частотна характеристика – відношення рівня чутливості від частоти [6].

Мікрофони розробляється таким чином, щоб мати кращу частотну характеристику або від опорного напрямку падіння звукових хвиль у вільному звуковому полі, або з випадковим напрямом падіння. В шумомірах нормативними документами встановлено що використовуватись можуть направлені мікрофони одно чи двосторонньої направленості, та ненаправлені. Ненаправлений мікрофон використовують в тому випадку коли кут падіння звукових хвиль відносно акустичної осі недетермінований, або він змінний в часі, що робить його оптимальним для

вимірювань в умовах забудови, чи середовищі що змінюється динамічно [6]. Конденсаторні ненаправлені мікрофони мають широкий частотний діапазон, висока чутливість забезпечує високу точність вимірювання. Також треба враховувати параметр лінійності, рівня шуму, можливості калібрування, форм фактор, наявність потрібних конекторів, та ціну. Оскільки в шумомірах використовуються зважені фільтри стандартизованої характеристики потрібно підбирати мікрофон з максимально рівномірною частотною характеристикою в усіх напрямках.

Для зменшення кінцевої ціни обираємо мікрофон Superlux ECM999, адже він відповідає всім необхідним якостям. Специфікація зображена на Рис. 2.5.1 та Рис. 2.5.2.

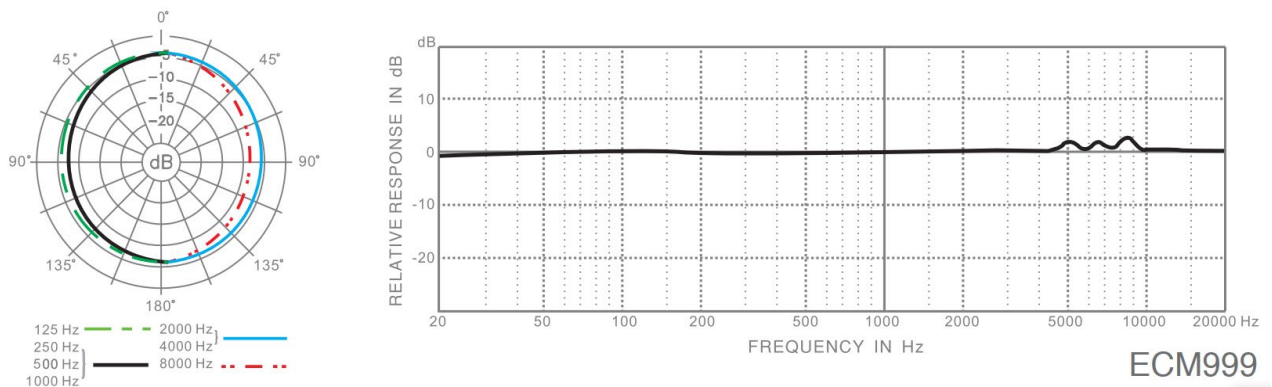


Рисунок 2.5.1 — Частотна характеристика мікрофона Superlux ECM999 [34]

Specifications	
Type	Back electret Ø6 mm (Ø0.24")
Polar Pattern	Omni
Frequency Response	20 – 20,000 Hz
Sensitivity	-37 dBV/Pa (14 mV)
Output Impedance	200 Ω
Min. Load Impedance	1,000 Ω
S/N Ratio	70 dB
Equivalent Output Noise	24 dB
Max. SPL	132 dB
Dynamic Range	108 dB
Power Requirements	12 – 52 V $\overline{=}$, 2 mA
Finish	Black
Connector	XLR3M
Dimensions	Ø21 × 192 mm (Ø0.83" × 7.56")
Net Weight	140 g (4.9 oz.)

Рисунок 2.5.2 — Специфікація мікрофона Superlux ECM999 [34]

2.6 Встановлені вимоги до пристрою

Система моніторингу шуму повинна відповідати групам вимог:

а) Вимоги до модуля:

1) Відповідність 1 класу точності:

- відповідність частотному діапазону (20-12.5 кГц);
- відповідність частотної характеристики виду А;
- зважування відносно кривих А, В, С;
- зважування по часу: швидке, повільне, імпульсне;
- регулювання діапазонів вимірювання;

б) Додаткові:

1) пристрій – частина розподіленої мережі;

2) автономне живлення;

3) функції:

— передача даних;

— перемикання діапазонів вимірювання, зважування по кривим та по часу.

Спираючись на визначені вимоги сформована структурна та функціональна схеми.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

В розділі розглянуто правила вимірювання шуму що встановлюються в нормативних документах. Описано складові вимірювального тракту, модель акустичного поля що використовується для визначення характеристик різних об'єктів. Приведено діаграми розташування точок вимірювання на поверхні.

Далі аналізуючи стандарти в яких встановлюються технічні вимоги до шумомірів наведено основні вимоги яким повинен відповідати вимірювальний модуль. Артикульовано концепцію системи моніторингу шуму як сукупності датчиків що з'єднані за сітчастою топологією. Для реалізації приладу обрано бездротовий протокол передачі даних, мікроконтролер та вимірювальний мікрофон.

На основі приведенного аналізу сформовано вимоги яким повинен відповідати вимірювальний модуль, що буде використано для подальшого схемотехнічного проектування.

Розділ 3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ

3.1 Принцип роботи, структурна схема

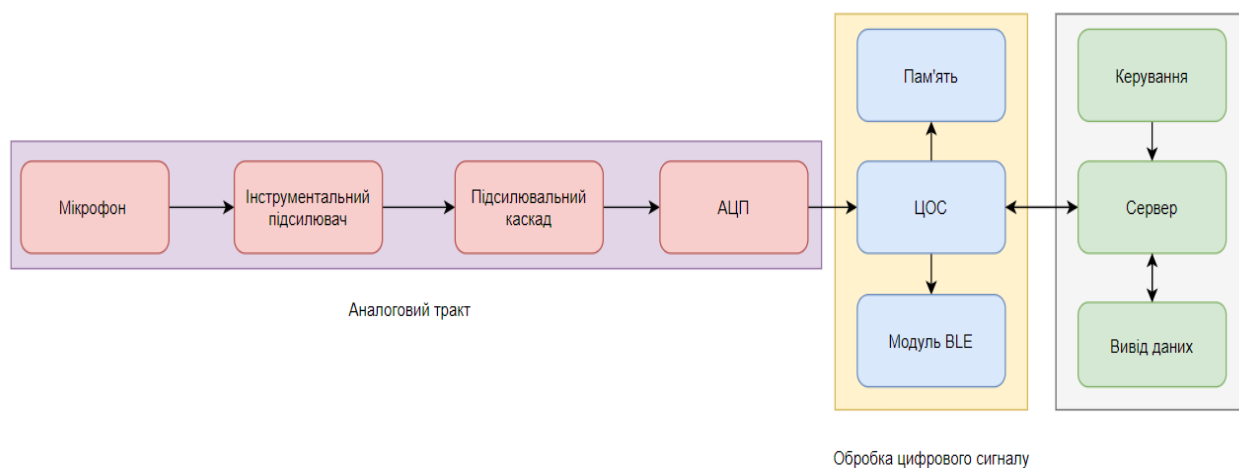


Рисунок 3.1.1 — Функціональна схема одиничного приладу

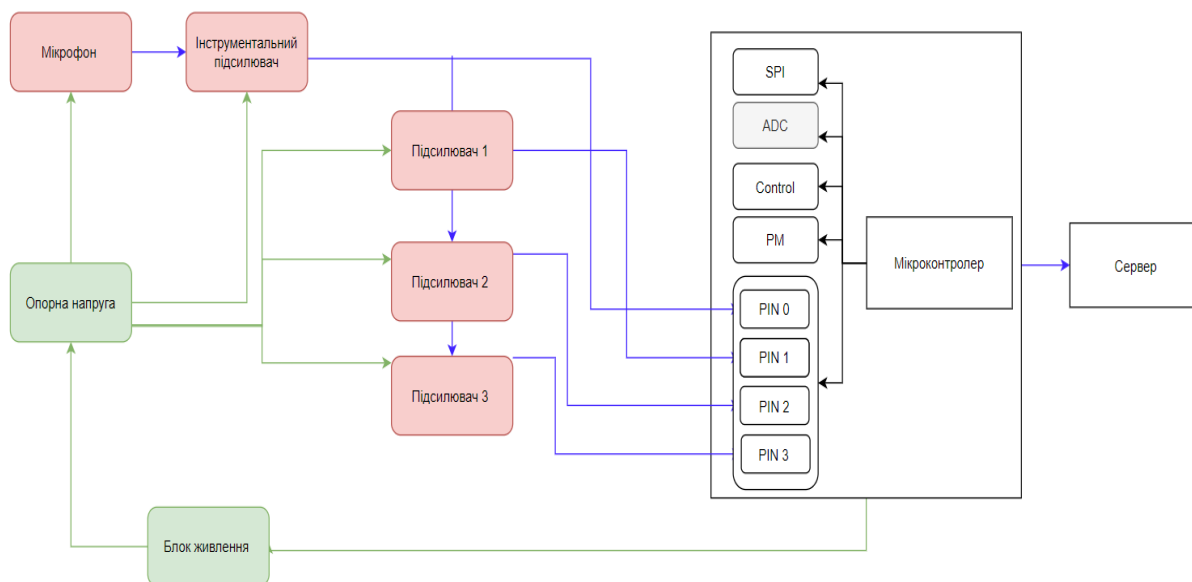


Рисунок 3.1.2 — Структурна схема одиничного приладу

На структурній схемі зеленим кольором позначені блоки живлення та шина живлення. Синім кольором позначена сигнальна лінія, червоним — аналогові блоки.

Представлені схеми описують модуль що є складовою системи моніторингу шумового забруднення, вимірювань рівня шуму. Модулі передають дані по BLE протоколу та об'єднані в сітчасту мережу.

Блок вимірювання призначений для зчитування та калькуляції рівня звукового тиску. Мікрофон зчитує сигнал від 10 Гц до 20 кГц, на виході сигнал слабкий, отже, потребує підсилення на блоці інструментального підсилювача. Далі після встановлення оптимального робочого рівня сигнал потрапляє на каскад підсилювачів, де встановлюється діапазон вимірювання за рівнем сигналу. Після цього сигнал потрапляє на вхід виводів плати з мікроконтролером і перетворюється на цифровий.

Роздільне батарейне живлення забезпечує енергомісткість та ефективність, конденсаторний мікрофон має достатню чутливість для передачі малої зміни тиску, сітчаста мережа забезпечує заміність та незалежність вузлів вимірювання.

Говорячи про вимоги до складових системи – мікрофон повинен бути професійним та максимально чутливим для точності вимірювань, фільтри та часові функції повинні накладатись на сигнал в реальному часі тому ЕОМ повинна бути достатньо потужною.

Для спрощення проєктування ЕОМ має бути складовою готової плати розробника з потужним АЦП, програмованими виводами GPIO, інтерфейсом керування живленням та SPI для підключення зовнішньої пам'яті та модулю передачі даних. Підсилювач та пам'ять мають бути виконані в формі мікросхем з можливістю ручного встановлення, які в свою чергу повинні бути наявні на ринку в країні та бути доступними в ціні.

Реалізація приладу може бути виконано двома шляхами. Перший передбачає реалізацію всіх етапів обробки аналоговими компонентами мінімізуючи навантаження на мікроконтролер. А саме реалізація інструментального підсилювача, каскаду підсилення, каскаду фільтрів, квадратора та пікового детектора. Недоліком цього підходу є більше енергоспоживання, залежність від калібрування, ускладнена схемотехніка.

Другий підхід передбачає, що реалізуються цифрові фільтри та зважування по часу, таким чином досягається більша енергоефективність та стабільність. Аналогова частина в такому випадку має інструментальний підсилювач, каскад підсилення та цей сигнал подається на виводи мікроконтролера.

Було обрано другий варіант реалізації що зазначено на Рис.3.1.1 та Рис.3.1.2. Для реалізації була проведено схемотехнічне проектування та синтез каскадів фільтрів що описано в наступних розділах

3.2 Опорна напруга

Блок на Рис.3.2.1 утворює опорну напругу, яка використовується в усіх подальших блоках схеми, інструментальному підсилювачі, підсилювальному каскаді. Блок призначений для того, щоб подавати половину напруги живлення. Таким чином робоча точка всіх підсилювачів знаходиться посередині між загальним вузлом і шиною живлення. Тобто має розмах напруги в одну і другу сторону від нуля і до плюсової напруги живлення — однакову. Це найкращий режим роботи з найбільшим динамічним діапазоном і найменшими спотвореннями [46,47].

Блок складається з подільника напруги утвореного R13 та R14 з рівними величинами опору, конденсатора C8 який зменшує викиди напруги, шуми та повторювача напруги на базі підсилювача.

Через протікання вхідних струмів в операційному підсилювачі на резисторах, вузлах, що під'єднані до інвертуючих, неінвертуючих входів ОП падає деяка напруга, зміщуючи робочу точку. Як наслідок вихідна напруга теж зсувається [40].

Щоб запобігти зсуву струму на входах та щоб падіння напруги було приблизно однаковим, потрібно аби власні провідності цих вузлів були однакові. Тому номінали резисторів R13 та R14 обираються однаковими. Якщо подільник має 2 резистори по 20 кОм, значить його еквівалентний опір в точці з'єднання резисторів буде 10 кОм, тому що кінці R13 і R14 підключені до джерела напруги з дуже низьким вихідним

опором. Резистори під'єднані паралельно, тому в коло зворотного зв'язку треба поставити резистор половинного опору R15.

Номінали R13 та R14 можуть бути обрані збільшеними чи зменшеними. В першому випадку, з великими опорами можуть виникати викривлення, на які також будуть впливати невраховані в першому наближенні фактори (розташування елементів, доріжок на платі, тощо). Зі зменшеним опором не буде встановлена робоча точка та схема лише буде мати збільшений струм споживання. Враховуючи це, обраний номінал є оптимальним та типовим для даних задач [39,40,46,47].

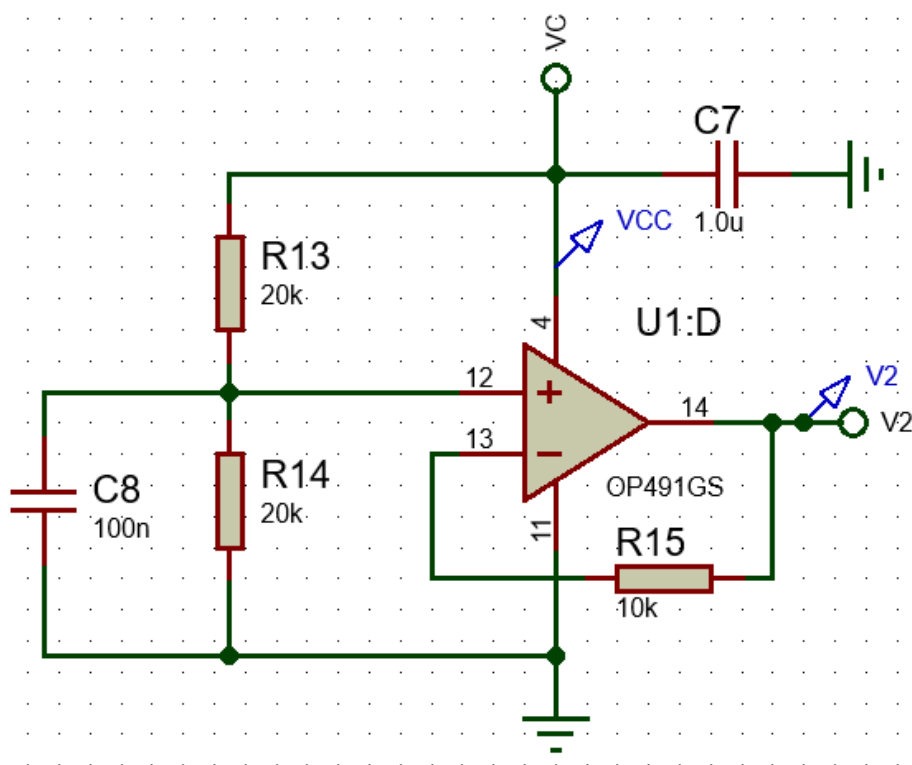


Рисунок 3.2.1 — Блок опорної напруги

3.3 Мікрофон та інструментальний підсилювач INA

Через резистори R21 і R22 подається так зване фантомне живлення. Тобто струм, що протікає через них, живить схему мікрофона. Одночасно ці резистори створюють вихідне навантаження внутрішнього підсилювача мікрофона. Тобто на них виділяються позитивна та негативна (умовно) напруги півхвилі коливань

звукової частоти. Ці напруги, які мають однакову абсолютну величину, та різні полярності, подаються на диференційні входи інструментального підсилювача. Конденсатор C13 перешкоджає шумам та наводкам у колі живлення мікрофона [39,40,45,46].

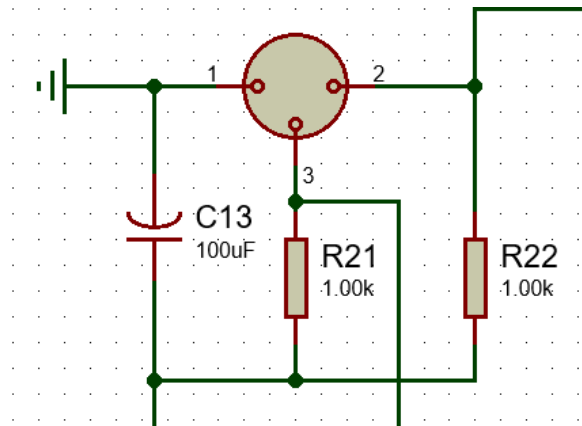


Рисунок 3.3.1 — Підключення мікрофона

Обраний мікрофон має чутливість в -37 дБВ/Па, вихідний імпеданс у 200 Ом. Оскільки для роботи з сигналом потрібно реалізувати функції вибору діапазону вимірювання, часової корекції та зважування за кривими, вихідний сигнал підсилюється до потрібно робочого рівня. Для цього використовується інструментальний підсилювач на мікросхемі.

Інструментальний підсилювач – підсилювач постійного струму, який має дуже великі входні опори, він обов’язково диференційний. Має дуже великий коефіцієнт пригніблення синфазної перешкоди, якщо в нас сигнали однаково подаються в фазі на інвертуючий, неінвертуючий входи значить вони повинні відніматись і на виході нічого не буде отримано. Він пригнічує приблизно на $70, 80, 90$ дБ, тобто дуже багато. Пригнічує синфазні перешкоди.

Обрано підсилювач INA122, адже він задовольняє вимоги до рівня власних шумів, діапазону підсилення, має регульований коефіцієнт підсилення, потребує

напругу живлення від 2.2 до 36 В. Мікросхема складається з двох операційних підсилювачів, схема наведена на Рис. 3.3.2 [39,40,45,46].

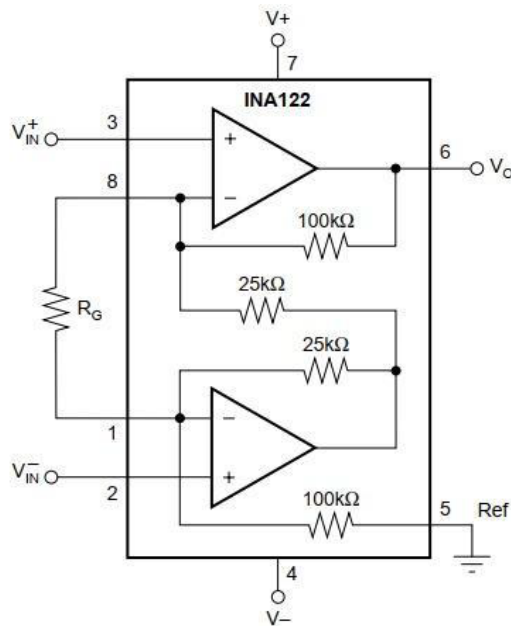


Рисунок 3.3.2 — Мікросхема INA122

Розглянемо схему підключення з обраними елементами. Резистори R17 та R18 не впливають на коефіцієнт підсилення, вони задають робочу точку входів, через ці резистори подається половинна напруга живлення, тобто входи знаходяться посередині між нулем живлення і напругою живлення. При даному співвідношенні на активних елементах, підсилювач працює в бажаному режимі з оптимальною продуктивністю та лінійністю. На вхід Ref також подається половина напруги живлення. У вимкненому стані або при повній тиші на 6 нозі інструментально – половина напруги живлення.

Ємність конденсаторів C9 та C10, разом з опорами резисторів утворюють фільтр верхніх частот, частота зрізу якого протилежно пропорційна постійній часу RC-ланки. RC-ланок загалом багато на схемі, кожна буде мати частоту зрізу в 5 Гц, на частоті в 20 Гц це буде виражено в декілька децибелів різниці.

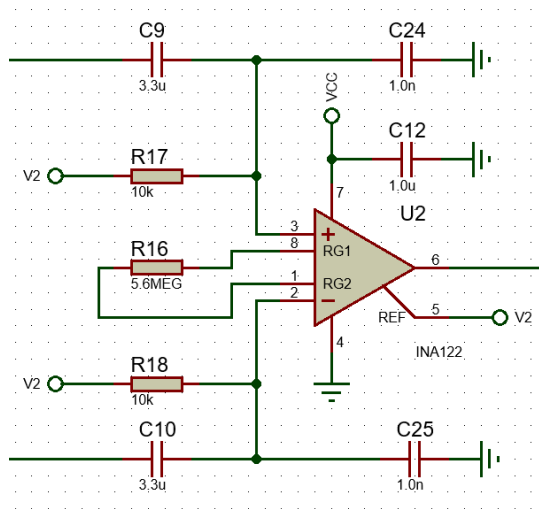


Рисунок 3.3.3 — Підключення інструментального підсилювача

Коефіцієнт підсилення регулюється резистором R16, при звуковому тиску 1.5 дБ на виході отримуємо 1.4-1.5 В. З цих міркувань обрано коефіцієнт підсилення близько 5, що розраховується за формулою (3.3.1):

$$G = 5 + \frac{200 \text{ кОм}}{R16} ; \quad (3.3.1)$$

Після ІІІ сигнал подається на подальший каскад підсилення на базі трьох ОП, де кожна ланка має свій вихід що комутується з мікроконтролером та обробляється АЦП. Було обрано конструктивне рішення що не передбачає встановлення в схемі цифрового комутатора. Кожна ланка підсилення та сигнал, що не надходить на каскад, а подається напряму з ІІІ, мають свої окремі виводи.

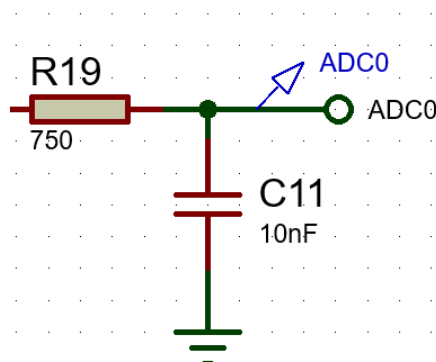


Рисунок 3.3.4 — Подача сигналу на вивід мікроконтролера

Перед подачею сигналу на мікроконтролер напряму з ПІ встановлено фільтр нижніх частот, що утворено R19, C11. Він потрібен для того, щоб зменшити перешкоди, похибку аналого-цифрового перетворення під час роботи схеми АЦП.

3.4 Схема автономного живлення

Основними параметрами, що впливають на конструкцію блоку живлення є вимога до автономності кінцевого приладу, напруга живлення, що потребується мікрофону, мікроконтролеру, операційним підсилювачам та іншим компонентам схеми [46,47].

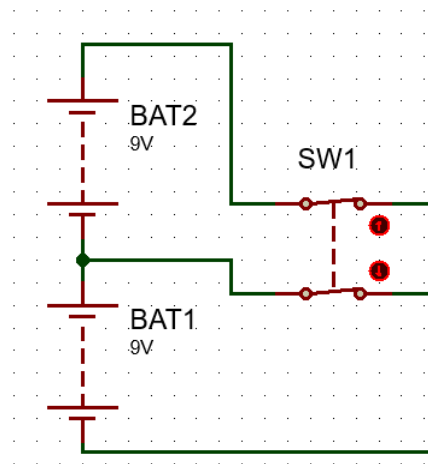


Рисунок 3.4.1 — Батареї живлення з кнопкою включення

Згідно зі специфікацією мікрофон Superlux потребує 12-52 В напруги, тому було прийнято рішення використати дві акумуляторні батареї на 9 В типорозміром РРЗ, які послідовно з'єднані (Рис.3.4.1). Таким чином отримується напруга в 18 В, що є достатньою для роботи приладу. Обрані батареї мають тривалий термін служби, оптимально підходять для пристрою, що знаходиться в режимі очікування та споживає невеликий струм. Також батареї мають високу щільність енергії, низьку схильність до саморозрядки та відносно стабільну вихідну напругу [39,46,47].

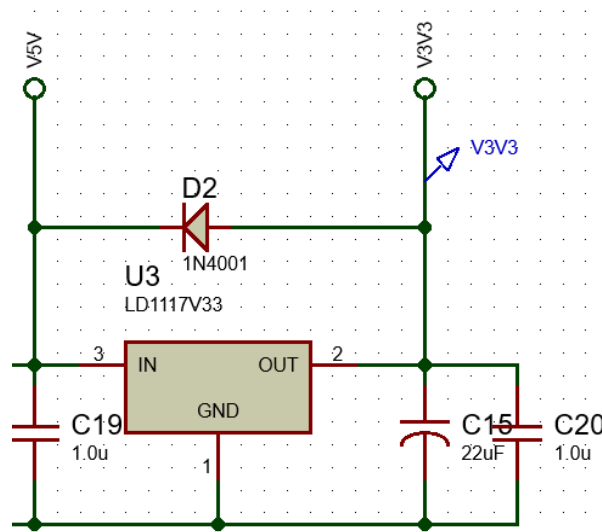


Рисунок 3.4.2 — Підключення стабілізатора напруги

Батареї підключені до двох стабілізаторів напруги на базі мікросхем LM7805CT та LM1117, кнопки включення на базі електронного комутатора. Стабілізатори мають ідентичну схему включення. LM7805CT опрацьовує напругу 5 В, LM117 - 3.3 В, для живлення аналогових блоків та МК. На вході та виході під'єднується конденсатор, через який подається на вхід від 7 до 15 В, яка перетворюється на задану (Рис.3.4.2) [39,46,47].

В середині мікросхеми знаходиться джерело опорної напруги, стабілітрон чи схема на транзисторах, яка підтримує стабільну напругу. Другий вузол – підсилювач з високим коефіцієнтом підсилення, і коло зворотного зв'язку. Вихідна напруга підсилювача, зрівнюється з еталонною, і, у залежності від того, регулюється більше чи менше відкривати джерело напруги.

Щоб зменшити шуми та резонансні явища у шині живлення встановлюється LC фільтр. Послідовно з індуктивністю включено опір R20, для того, щоб зменшити добротність коливального контуру, щоб не було викидів на частоті власного резонансу. Фільтр складається з конденсаторів C22,C23 на одному боці, C18, C21,C14, C19 на другому, між ними стоїть індуктивність L1, що працює на високих частотах.

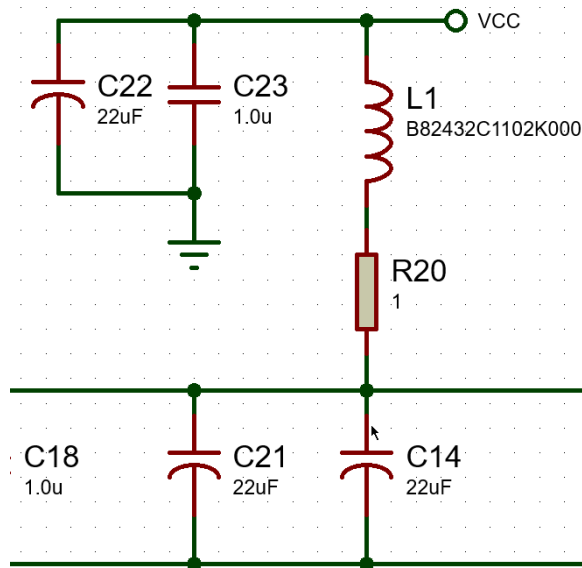


Рисунок 3.4.3 — Схема LC фільтру

Конденсатори великої ємності закорочують вхід та вихід цієї схеми – в результаті вона стабільна. Конденсатори потрібні для того, щоб стабілізувати роботу стабілізатора, якщо їх відключити чи під'єднати довгими провідниками, це може призвести до нестабільності. Оскільки C1 не буде працювати на високих частотах, це компенсується паралельним під'єднанням великої та відносно меншої ємностей.

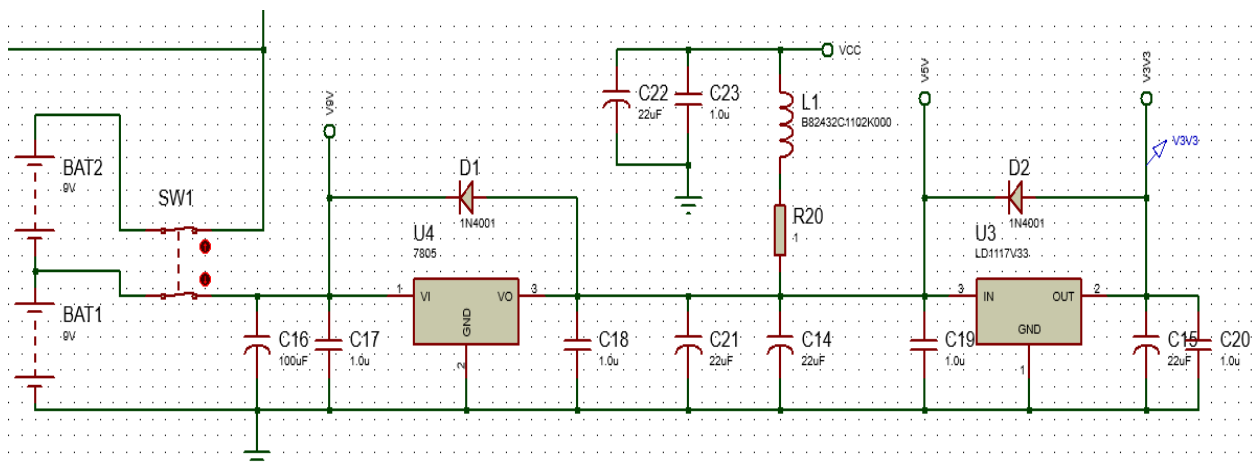


Рисунок 3.4.4 — Загальна схема блоку живлення

Діоди в схемі потрібні для захисту стабілізатора від зворотного струму, який може виникнути, наприклад, при вимкненні живлення або перемиканні навантаження. Загальна схема аналогової частини модуля вимірювання представлена на Рис. 3.4.5.

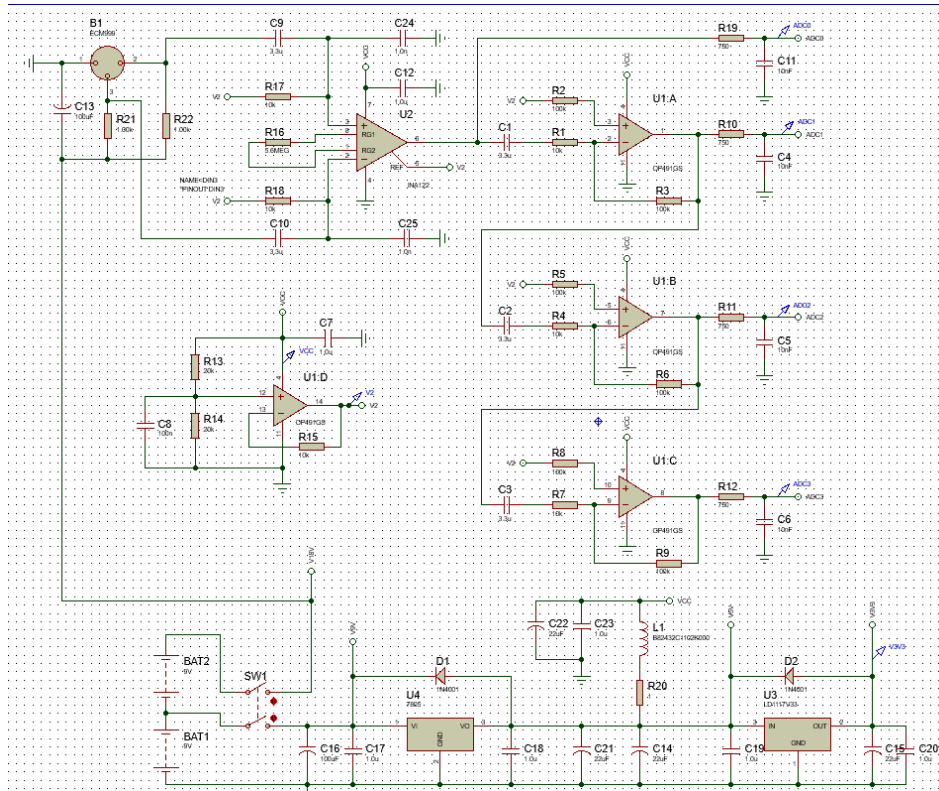


Рисунок 3.4.5 — Загальна схема аналогової частини

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

В рамках даного розділу було сформовано структурну та функціональну схему приладу, визначено організацію та вимоги до системи. На базі схем було висунуто декілька підходів до проєктування. Обрано варіант що передбачає реалізацію цифрових фільтрів та зважування за часом. Аналогова частина складається з інструментального підсилювача, каскаду підсилення.

Система в якій всі структурні блоки аналогові потребує реалізації квадратора, пікового детектора та фільтрів що призведе до значно більшого енергоспоживання. Для концепції системи важливо зберегти її автономність та низьке енергоспоживання.

Кінцева схема аналогової частини складається з блоків: опорної напруги, інструментального підсилювача, автономного живлення та каскаду підсилення. Сформоване схемотехнічне рішення дозволяє реалізувати функцію вибору діапазону вимірювання. Якщо сигнал після підсилення на ІІ має достатньо високий рівень — він не потребує подальшого підсилення і може бути оброблений мікроконтролером, адже має окремий вивід. Сигнали низького рівня подаються на каскад підсилення де кожна ланка підсилення має свій вивід та підсилює сигнал десятикратно. Наступним кроком в проектування є синтез фільтрів якими досягається зважування по кривим А, В, С.

Розділ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРІВ

4.1 Аналіз реалізації фільтрів

Функції зважування по кривим відповідно вагового коефіцієнта А, В, С зазначаються в стандартах [21]. Частотне зважування досягається каскадом ФНЧ та ФВЧ фільтрів, оскільки криві мають складну форму спектральної чутливості, що змінюється в залежності від частоти. Неможливо досягти форми кривої одним аналоговим фільтром. Посилаючись на роботу [48], криві можуть бути сформовані каскадом RC фільтрів, з центральними частотами, що розраховуються як:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \omega_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.1.1)$$

Реалізація цифрових фільтрів з ваговими коефіцієнтами досягається комбінацією еквівалентних цифрових фільтрів, таким чином, щоб вхідний сигнал спочатку оброблявся першим фільтром, потім другим, і так далі. Побудуємо модель аналогових фільтрів в Multisim на базі операційних підсилювачів для підтвердження отримання кривих при заданому каскаді. Отримані результати моделювання реалізуються в програмному коді, що записується в пам'ять плати розробника з мікроконтролером. Згідно зі структурною схемою в [48] каскади формуються таким чином як зазначено на Рис. 4.1.1.

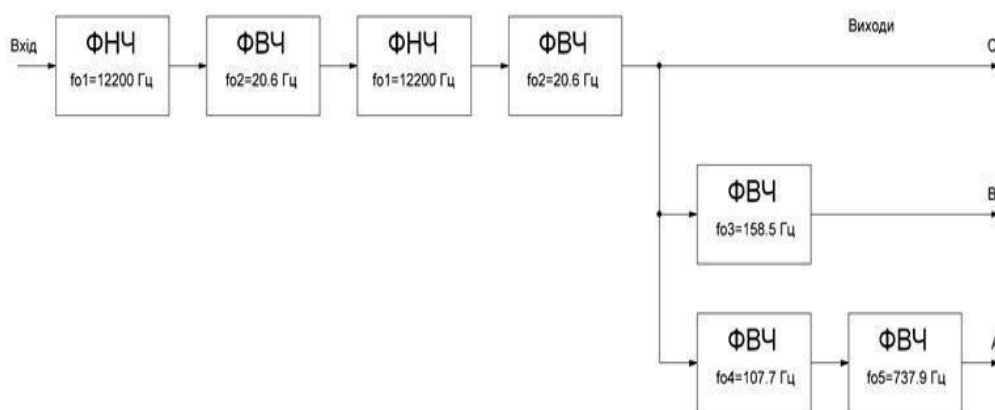


Рисунок 4.1.1 — Каскад фільтрів для отримання зважувальних кривих

Загальними для всіх типів фільтрів є ланки 1-го порядку, що задіяні в формуванні характеристики типу С. Кожна ланка являє собою RC фільтр першого порядку, що має великий вихідний опір.

RC-ланка з великим опором складається з резистора (R) і конденсатора (C), за умови, що опір резистора є значно більшим порівняно з опором інших елементів або зовнішнього навантаження.

Резистор грає роль обмежувача струму, а конденсатор виконує функцію акумулятора заряду. Коли вмикається ланка, конденсатор починає заряджатися через резистор. Процес зарядки конденсатора визначається постійним часом RC, де R - опір резистора, а C - ємність конденсатора.

Якщо опір резистора великий, час зарядки конденсатора буде значно збільшено. Це означає, що конденсатор заряджатиметься повільно і досягне свого

максимального заряду за більш тривалий час. З цього випливає, що розрядження конденсатора відбуватиметься повільно, коли ланцюг вимкнено або напруга на ньому змінюється.

Безпосереднє з'єднання таких ланок неможливе, що пояснюється взаємним впливом цих ланок, що призведе до спотворення передавальної функції. Внутрішній опір може позначитися на загальній характеристиці каскаду і призвести до втрати точності або зміни часових характеристик.

При паралельному з'єднанні кількох конденсаторів між ними виникає взаємна ємність, яка може вносити додаткові ефекти в ланцюг. Це може призвести до небажаної взаємодії між різними RC-ланцюгами та втратою точності чи стабільності роботи. Ланцюги можуть також впливати на одне одного та приводити до спотворень у загальній системі, тобто буде виникати інтерференція.

Найпростішим розв'язання цієї проблеми було б застосування повторювачів напруги на базі операційних підсилювачів (ОП), що мають великий вхідний опір і практично нульовий вихідний. Але для цього потрібна була б велика кількість ОП (7 згідно з числом ланок).

Передавальна функція не залежить від порядку з'єднання ланок, тому є можливість згрупувати ланки 1-го порядку в ланки другого порядку. Так, для формування характеристики С можна використати дві практично ідентичних ланки першого порядку, що об'єднують ФНЧ та ФВЧ. Крім того, для формування характеристики А можна об'єднати дві ланки ФВЧ 1-го порядку в одну ФВЧ 2-го порядку. Це дозволить зменшити кількість ОП з 7 до 4 і спростити електричну схему.

4.2 Розрахунок та аналогове моделювання фільтрів

Опираючись на аналіз описаний вище виконується моделювання фільтрів відносно розрахованої передавальної функції. Далі виконаємо розрахунки у середовищі Mathcad14. Зазначається частота зрізу та константи для корегування розрахунків (Рис. 4.2.1).

$$\begin{pmatrix} f01 \\ f02 \\ f03 \\ f04 \\ f05 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 12200 \\ 20.6 \\ 158.5 \\ 107.7 \\ 737.9 \end{pmatrix} \text{ Hz}$$

$$\begin{aligned} \text{CorampA} &:= 1.2589 \\ \text{CorampB} &:= 1.01972 \\ \text{CorampC} &:= 1.007146 \end{aligned}$$

Рисунок 4.2.1 — Частоти зрізу та корегувальні коефіцієнти

Зазначимо вираз для кожної ланки каскаду та корегувальної кривої, передавальні функції (Рис. 4.2.2).

$$\begin{aligned} \text{RC}(f) &:= \frac{f01^2 \cdot f^2}{(f^2 + f02^2) \cdot (f^2 + f01^2)} \\ \text{RB}(f) &:= \text{RC}(f) \cdot \frac{f}{\sqrt{f^2 + f03^2}} \\ \text{RA}(f) &:= \text{RC}(f) \cdot \frac{f^2}{\sqrt{f^2 + f04^2} \cdot \sqrt{f^2 + f05^2}} \end{aligned}$$

Рисунок 4.2.2 — Передавальна функція

Оскільки фільтри для кривої С однакові вони можуть бути об'єднані в ланки другого порядку. Далі вводиться значення досліджуваної частоти, корегування до децибелів та виведення кінцевої характеристики в децибелах (Рис. 4.2.3, Рис. 4.2.4, Рис. 4.2.5, Рис. 4.2.6).

$$ff := 10, 20 \dots 20000$$

Рисунок 4.2.3 — Досліджувана частота

$$db(x) := 20 \cdot \log(|x|)$$

Рисунок 4.2.4 — Функція переведення в дБ

$$AA(f) := \text{db}(\text{CorampA} \cdot RA(f))$$

$$AB(f) := \text{db}(\text{CorampB} \cdot RB(f))$$

$$AC(f) := \text{db}(\text{CorampC} \cdot RC(f))$$

Рисунок 4.2.5 — Характеристика в дБ

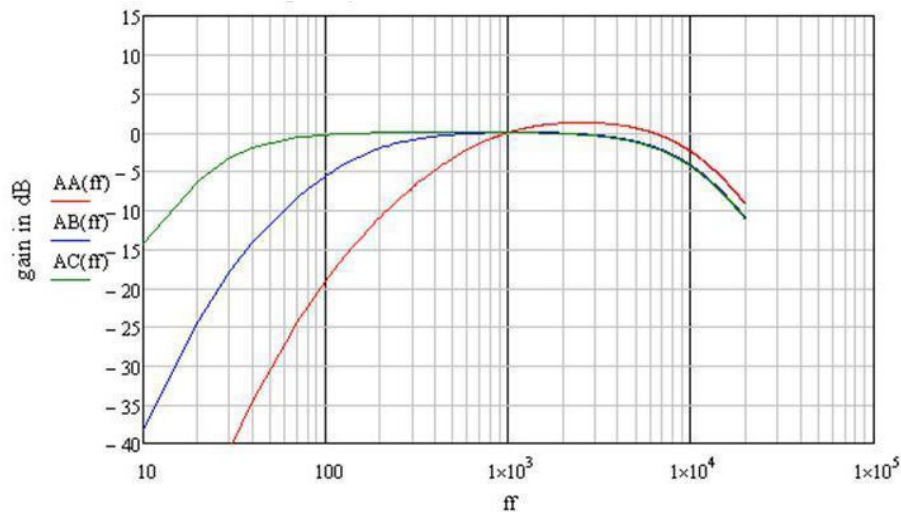


Рисунок 4.2.6 — Отримані криві

Як бачимо, результати збігаються з кривими гучності, зазначеними в стандартах, згідно з Рис. 1.1.1 (див. стор. 8). Якщо відомі частоти зрізу та всі вони стосуються ланок першого порядку, це означає, що всі полюси передавальної функції дійсні. З цього випливає те, що замість частот зрізу можна встановити постійні часу (Рис. 4.2.7).

Передавальна функція ланки другого порядку може мати два однакових дійсних полюса, два різних дійсних полюса або два комплексно-спряжених дійсних полюсів. Виходячи з цього, ланку другого порядку можна представити як дві ланки першого порядку і перемножити на передавальну функцію. Кожна ланка першого порядку може бути представлена одним нулем і одним полюсом передавальної функції.

Якщо в нас є електричні кола, стаціонарний ланцюг з концентрованими параметрами. Вони мають передавальні функції у вигляді дробно-раціональних

функцій, в чисельнику і знаменнику стоять поліноми. Поліном n-того порядку має рівну кількість коренів. Корені чисельника називаються нулями, тому що в них передавальна функція обертається в нуль. Нулі — це корені чисельника, полюси — це корені знаменника.

Оскільки ми маємо постійні часу ланок першого порядку і ми знаємо, що це фільтр верхніх або нижніх частот, з цього випливає, що ми можемо однозначно записати їх передавальну функцію.

В такому вигляду будуть представлятися передавальні характеристики, таким чином маючи кінцеву передавальну функцію до неї підбирається ланка що їй відповідає.

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{pmatrix} := \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{f_{01}} \\ \frac{1}{f_{02}} \\ \frac{1}{f_{03}} \\ \frac{1}{f_{04}} \\ \frac{1}{f_{05}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.305 \times 10^{-5} \\ 0.008 \\ 0.001 \\ 0.001 \\ 2.157 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.2.7 — Розрахунок постійних часу

Передавальна характеристика для кривої С має четвертий порядок, оскільки вона формується чотирма фільтрами першого порядку, двома однаковими фільтрами ФНЧ та ФВЧ.

Якщо вони однакові, то їх можна поєднати в ланки другого порядку. Тому ми розбиваємо ланку четвертого порядку на дві однакові другого порядку і кожна ланка другого порядку має передавальну функцію представлену на Рис. 4.2.8.

$$WC1(p) := \frac{p \cdot \tau_2}{(p \cdot \tau_1 + 1) \cdot (p \cdot \tau_2 + 1)}$$

Рисунок 4.2.8 — Передавальна функція ланок першого порядку

Загальна передавальна функція С ланки має вигляд (Рис. 4.2.9).

$$WC(p) := \text{CorampC} \cdot \frac{(p \cdot \tau_2)^2}{(p \cdot \tau_2 + 1)^2} \cdot \frac{1}{(p \cdot \tau_1 + 1)^2}$$

Рисунок 4.2.9 — Передавальна функція С ланки

Далі відносно виразу підбирається ланка вигляду (Рис. 4.2.10).

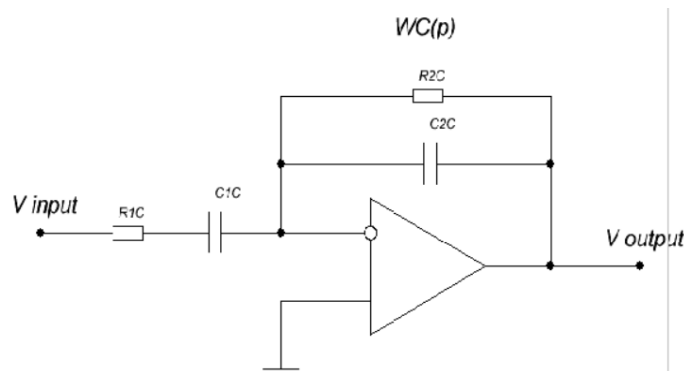


Рисунок 4.2.10 — Реалізація ланки С

Вона побудована на ОП, значить коефіцієнт передачі інвертуючого підсилювача на базі операційного має функцію передачі, яка дорівнює опору у колі зворотного зв'язку поділеного на опір вхідного. Якщо виразити опори в операторному вигляді – отримаємо передавальну функцію такого вигляду і будемо бачити, що з себе являє τ_1 , τ_2 , як вони пов'язані з опором резисторів і з ємністю конденсаторів. Розрахунок приведено на Рис. 4.2.11.

$$R := 100 \cdot 10^3 \quad \text{Ом}$$

$$R1C := R \quad \text{Ом}$$

$$C1C := \frac{\tau_2}{R1C} = 77.26 \cdot 10^{-9} \quad \text{Фарад}$$

$$R21C := R1C = 100 \cdot 10^3 \quad \text{Ohms}$$

$$C21C := \frac{\tau_1}{R21C} = 130.455 \cdot 10^{-12} \quad \text{Фарад}$$

$$R22C := R1C \cdot \text{CorampC} = 100.715 \cdot 10^3 \quad \text{Ом}$$

$$C22C := \frac{\tau_1}{R22C} = 129.529 \cdot 10^{-12} \quad \text{Фарад}$$

Рисунок 4.2.11 — Розрахунок номіналів С ланки

Розрахунок для В каскаду, першого та другого порядків (Рис. 4.2.12, Рис. 4.2.13).

$$WB(p) := WC(p) \cdot \frac{\text{CorampB}}{\text{CorampC}} \cdot \frac{p \cdot \tau_3}{p \cdot \tau_3 + 1} \quad \blacksquare$$

$$WB1(p) := \frac{\text{CorampB}}{\text{CorampC}} \cdot \frac{p \cdot \tau_3}{p \cdot \tau_3 + 1} \quad \blacksquare$$

Рисунок 4.2.12 — Передавальна функція ланок В

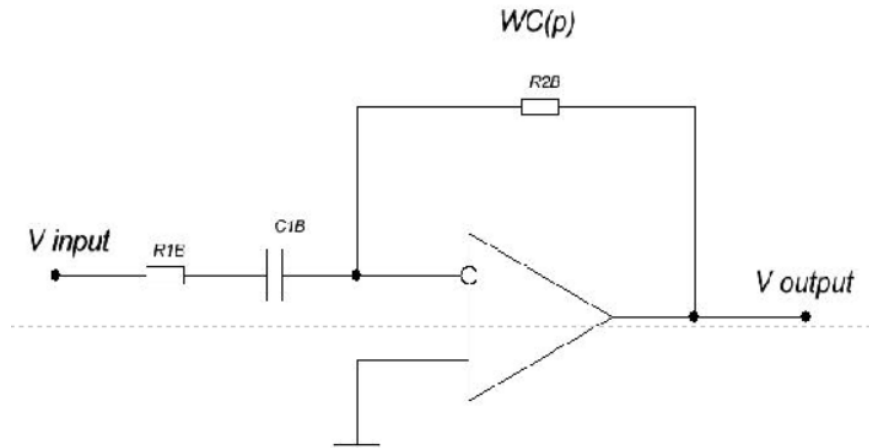


Рисунок 4.2.13 — Реалізація ланки В

Розрахунок номіналів для В каскаду (Рис. 4.2.14).

$$R1B := R = 100 \cdot 10^3$$

$$C1B := \frac{\tau_3}{R1B} = 10.041 \cdot 10^{-9}$$

$$R2B := R1B \cdot \frac{CorampB}{CorampC} = 101.248 \cdot 10^3$$

Рисунок 4.2.14 — Розрахунок номіналів В ланки

Розрахунок для А каскаду, першого та другого порядків (Рис. 4.2.15, Рис. 4.2.16). Для знаходження номіналів потрібно виконати вирішення системи нелінійних рівнянь.

$$W_A(p) := W_C(p) \cdot \frac{\text{CorampA}}{\text{CorampC}} \cdot \frac{p \cdot \tau_4}{p \cdot \tau_4 + 1} \cdot \frac{p \cdot \tau_5}{p \cdot \tau_5 + 1} \quad \blacksquare$$

$$W_{A1}(p) := \frac{\text{CorampA}}{\text{CorampC}} \cdot \frac{p \cdot \tau_4}{p \cdot \tau_4 + 1} \cdot \frac{p \cdot \tau_5}{p \cdot \tau_5 + 1} \quad \blacksquare$$

$$W_{A1}(j\omega) := \frac{\text{CorampA}}{\text{CorampC}} \cdot \frac{\omega^2}{-\omega^2 + j\omega \cdot \frac{\tau_4 + \tau_5}{\tau_4 \cdot \tau_5} + \frac{1}{\tau_4 \cdot \tau_5}} \quad \blacksquare$$

Рисунок 4.2.15 — Передавальна функція ланок А

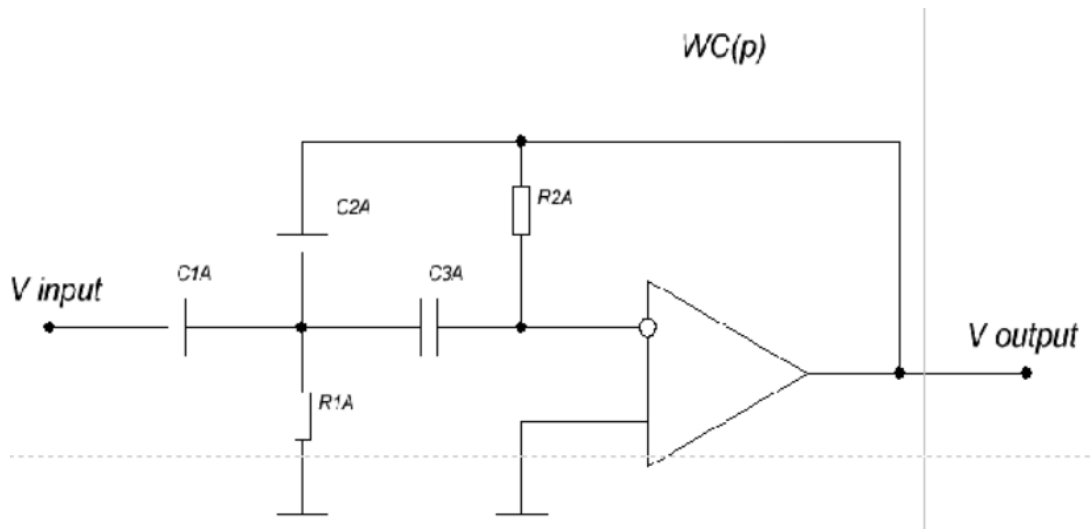


Рисунок 4.2.16 — Реалізація ланки А

Підставимо елементи в рівняння (Рис. 4.2.17).

$$W_{HPF2}(j\omega) := \frac{C1}{C2} \cdot \frac{\omega^2}{-\omega^2 + j\omega \cdot \left[\frac{1}{R2} \cdot \left(\frac{C1}{C2 \cdot C3} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3} \right) \right] + \left(\frac{1}{R1 \cdot R2 \cdot C2 \cdot C3} \right)} \quad \blacksquare$$

Рисунок 4.2.17 — Передавальна функція лаки А з підставленими елементами

Вирішимо систему рівнянь (Рис. 4.2.18, Рис. 4.2.19).

$$R2A := R = 100 \cdot 10^3$$

$$R1a := R2A = 100 \cdot 10^3$$

$$C2a := \sqrt{\frac{\tau4 \cdot \tau5}{R1a \cdot R2A}} = 5.646 \cdot 10^{-9}$$

$$C1a := C2a \cdot \frac{CorampA}{CorampC} = 7.057 \cdot 10^{-9}$$

$$\underline{K} := \frac{CorampA}{CorampC} = 1.24997$$

Рисунок 4.2.18 — Розрахунок номіналів А ланки

$$\frac{1}{R2A} \cdot \left(K \cdot \frac{1}{C2a} + \frac{1}{C2a} + \frac{1}{C2a} \right) = \frac{\tau4 + \tau5}{\tau4 \cdot \tau5}$$

$$\frac{1}{R1a \cdot R2A \cdot C2a \cdot C2a} = \frac{1}{\tau4 \cdot \tau5}$$

$$\frac{C1a}{C2a} = K$$

$$\begin{pmatrix} C1A \\ C2A \\ R1A \end{pmatrix} := \text{Find}(C1a, C2a, R1a) = \begin{pmatrix} 7.646 \times 10^{-9} \\ 6.117 \times 10^{-9} \\ 8.518 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.2.19 — Корені рівняння для кривої А

Змоделюємо розраховані фільтри в Multisim 14. В якості базового ОП виберемо низьковольтний ОР491 (Analog Devices). Один корпус такої ІМС містить 4 ОП з загальними виводами живлення. Модель фільтрів та результати моделювання показані нижче на Рис. 4.2.20 та Рис. 4.2.21.

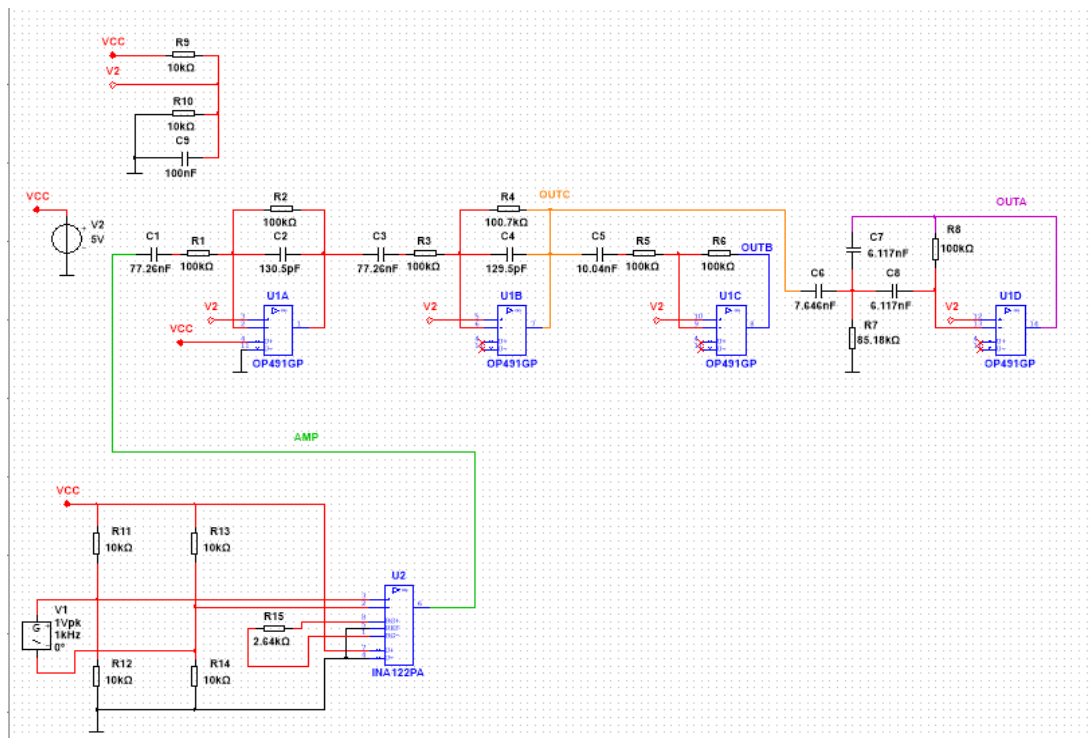


Рисунок 4.2.20 — Схема моделювання фільтрів

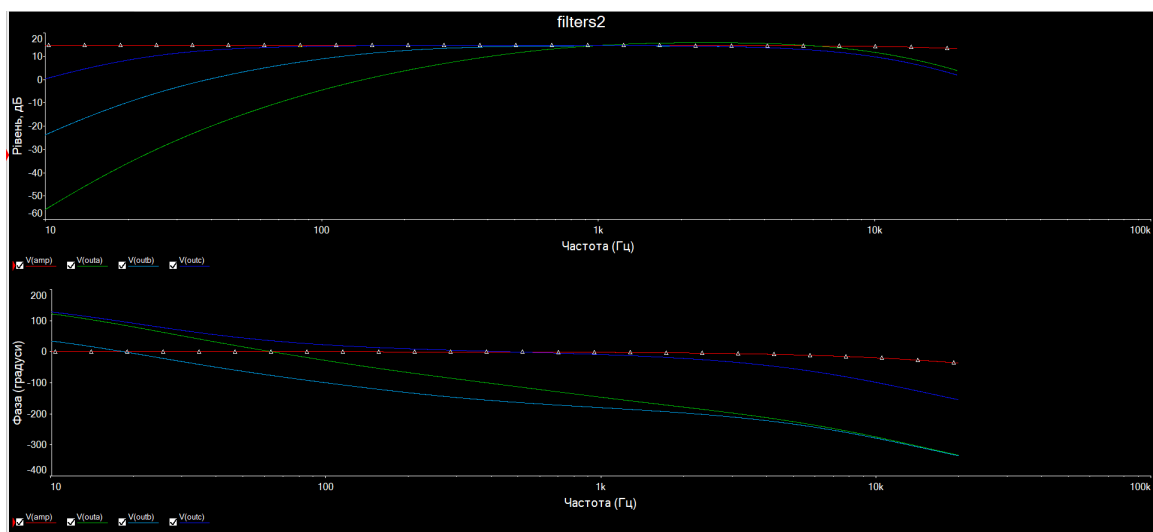


Рисунок 4.2.21 — Результати аналізу

Можна стверджувати, що отримані АЧХ практично збігаються з розрахованими. Оскільки в моделі обрані номінали елементів для досягнення показників, треба обрати реальні компоненти з наближеними до змодельованих номіналами, намагаючись досягти відхилення в межах 1%. Далі приведемо схему після впорядкування номіналів та результати моделювання (Рис. 4.2.22, Рис. 4.2.23).

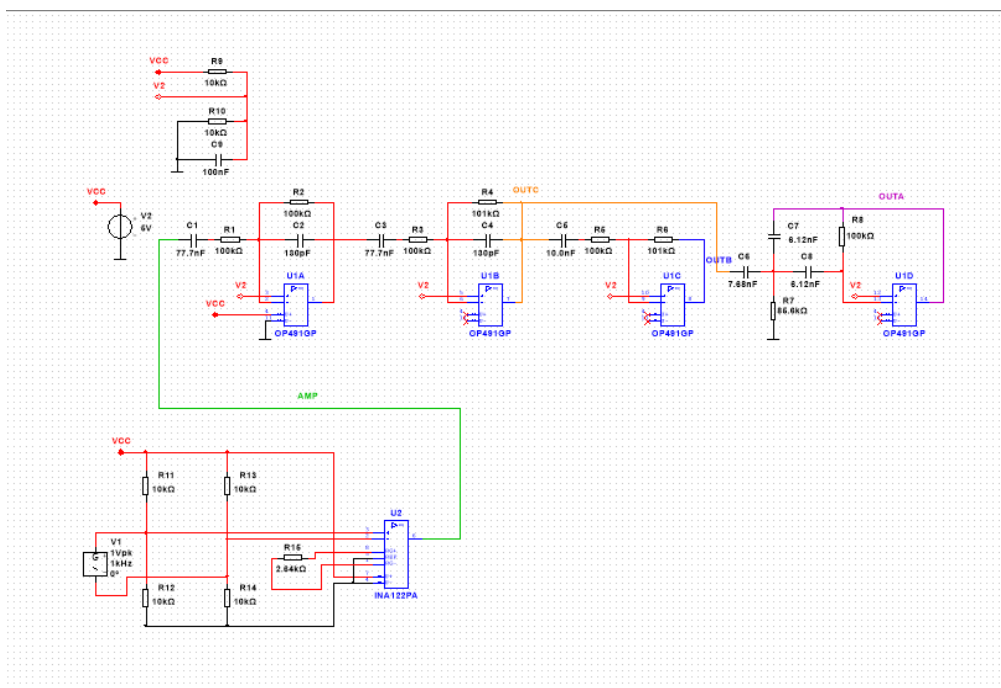


Рисунок 4.2.22 — Схема моделювання фільтрів з корегованими номіналами

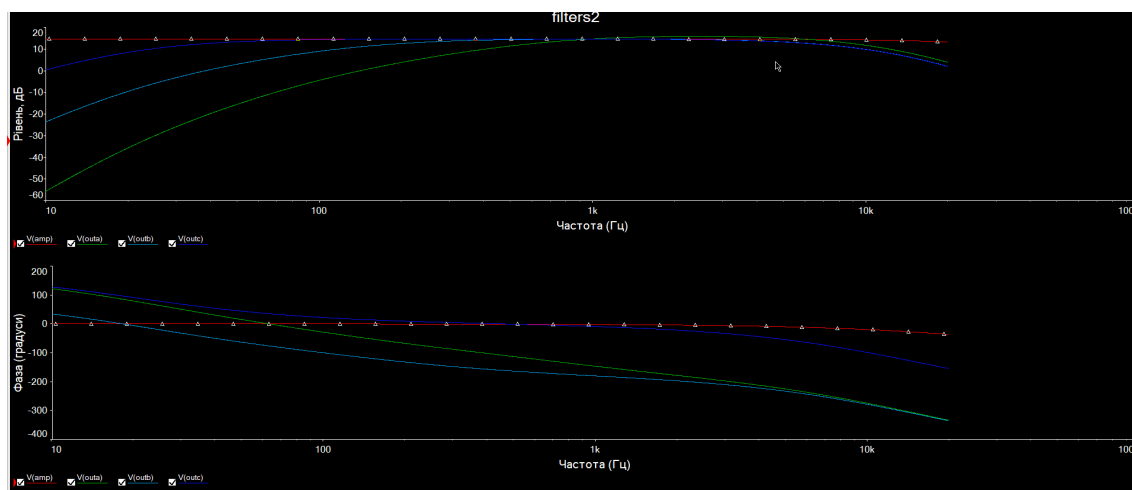


Рисунок 4.2.23 — Схема моделювання фільтрів з корегованими номіналами

Практично заміна номіналів на найближчі не призвела до помітного спотворення АЧХ фільтрів, що підтверджує можливість практичної реалізації фільтрів навіть при розбіжностях параметрів елементів.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

Згідно з приведеною структурною схемою каскадів нормування за кривими було побудовано модель фільтрів на базі ОП. Каскади складаються з RC ланок першого порядку. Розрахунок відбувається методом приведення виразу передавальної функції та підбором відповідної цьому виразу ланки на ОП. Для кожної ланки розраховуються номінали елементів.

Після отримання кінцевих результатів, набору розрахованих ланок проводиться підтвердження аналітичних розрахунків в Multisim 14. Результати симуляції підтверджують коректність роботи каскаду фільтрів. Таким чином реалізується функціонал зважування за кривими в кінцевому вигляді.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена розробці системи моніторингу шуму. У ході виконання роботи було спроектовано блок вимірювання призначений для зчитування, підсилення та подання сигналу на виводи плати розробника. Було розраховано та змодельовано каскад фільтрів для приведення сигналу до корегувальних кривих А, В, С.

Розділи один та два були присвячені комплексному теоретичному аналізу для формування вимог до кінцевого приладу. В ході теоретичної частини було приведено основну фізичну модель для дослідження процесу розповсюдження звукових коливань та виведення основних їх параметрів, окреслено загальний аналітичний апарат опису та дослідження звуку, було виведено абсолютні та відносні величини, встановлено зв'язок з суб'єктивними параметрами. Приведено поняття коригувальних кривих рівнів в шумомірах, сприйняття гучності людиною. Також була спроба дослідити різницю в регулюванні шумового забруднення у законодавстві України та ЄС. Встановлено основні нормативні документи, що регулюють шумове забруднення та технічні параметри шумомірів. Розглянуто правила вимірювання шуму що встановлюються в нормативних документах. Описано складові вимірювального тракту, модель акустичного поля що використовується для визначення характеристик різних об'єктів. Приведено діаграми розташування точок вимірювання на поверхні.

Далі спираючись на проведений аналіз було сформовано кінцеві вимоги до приладу та проведено підбір мікрофона, бездротового протоколу, мікроконтролеру.

В практичній частині на основі вимог було реалізовано структурну та функціональну схему приладу, визначено організацію та вимоги до системи. Обрано варіант реалізації вимірювального модуля що передбачає реалізацію цифрових фільтрів та зважування за часом. Аналогова частина складається з інструментального

підсилювача, каскаду підсилення. Запроєктоване схемотехнічне рішення реалізує функцію вибору діапазону вимірювання. Далі були розраховані коригувальні фільтри та побудована модель що підтверджує теоретичні розрахунки.

У ході виконання даної дипломної роботи, попри всі зусилля, деякі з поставлених завдань не були повністю вирішені. Оскільки для реалізації функцій цифрової фільтрації, зважування по часу та передачі даних через бездротову технологію потрібно було зібрати кінцевий прилад на елементній базі та провести тестування, що може бути зроблено в подальших академічних роботах. Невдачі та складності, що виникають у ході наукових досліджень, є невід'ємною частиною академічного процесу. Важливо відзначити, що при виконанні цієї роботи були виявлені певні обмеження та складності, які перешкоджали повному вирішенню деяких завдань.

Тим не менш, отримані схемотехнічні рішення та розрахунки, концептуалізація теми системи моніторингу розвиває даний напрям досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Грінченко В.Т., Вовк І.В., Мадипур В.Т., Основи акустики. Навчальний посібник. Авторизований доповнений переклад з української. Наукова думка, 2007. - 640 с.
- [2] Найда С. А. і Желяскова Т. М., «Фізична акустика», 2018, Дата звернення: 21, Травень 2023. [Online]. Доступний у: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41043>
- [3] Коржик О.В, Теоретичні основи акустики. Конспект лекцій. КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019.
- [4] Луньова С. А., Акустична екологія. Конспект лекцій. КПІ імені Ігоря Сікорського, 2021. Дата звернення: 21, Травень 2023. [Online]. Доступний у: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46032>
- [5] Луньова С. А., Акустичний моніторинг. Конспект лекцій. КПІ імені Ігоря Сікорського, 2021. Дата звернення: 21, Травень 2023. [Online]. Доступний у: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46031>
- [6] Луньова С. А., Електроакустична апаратура. Конспект лекцій. КПІ імені Ігоря Сікорського, 2021. Дата звернення: 21, Травень 2023. [Online]. Доступний у: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46030>
- [7] Leo L. Beranek, Acoustical Measurements (rev.). Acoustical Soc. of Amer., 1993. Дата звернення: 25, Квітень 2023. [Online]. Доступний у: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=05e4b7e7161041231a879e42b80d763c>
- [8] Hendsy D., Noise: A Human History of Sound and Listening. Ecco, 2013. Дата звернення: 14, Травень 2023. [Online]. Доступний у: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=2293e223ca823bce86d4838186be8c8c>
- [9] Тейлор Р., Шум. в В мире науки и техники. МИР, 1978. Дата звернення: 20, Квітень 2023. [Online]. Доступний у: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=4e3995d1b0ee9615b666713423dd194d>
- [10] Kitsoft, «Державна інспекція архітектури та містобудування України - Державні будівельні норми». <https://diam.gov.ua/normativno-pravovi-akti/derzhavni-budivelni-normi> (дата звернення 24, Квітень 2023).
- [12] Kitsoft, «Коли і де не можна шуміти?», Офіційний портал КМДА - Головна. https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie_seredovyshe_mista/shum/815/ (дата звернення 24, Квітень 2023).
- [13] Kitsoft, «Коли не діє заборона на шум?», Офіційний портал КМДА - Головна. https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie_seredovyshe_mista/shum/817/ (дата звернення 24, Квітень 2023).
- [14] Kitsoft, «Шум», Офіційний портал КМДА - Головна. https://kyivcity.gov.ua/navkolyshnie_seredovyshe_mista/shum/ (дата звернення 24, Квітень 2023).
- [15] «ГОСТ 17187—2010».
- [16] «ISO 9612:2009, Acoustics — Determination of occupational noise exposure — Engineering method, IDT».
- [17] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise - Declaration by the Commission in the Conciliation Committee on the Directive relating to the assessment and management of environmental noise, вип. 189. 2002. Дата звернення: 14, Травень 2023. [Online]. Доступний у: <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/49/oj/eng>
- [18] «EUR-Lex - 32002L0049 - EN - EUR-Lex». <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32002L0049> (дата звернення 14, Травень 2023).

[19] «Agencies of the European Union», Wikipedia. 09, Травень 2023. Дата звернення: 14, Травень 2023. [Online]. Доступний у: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Agencies_of_the_European_Union&oldid=1153919590

[20] «Фильтры электронные, октавные, треть октавные».

[21] «ГОСТ 22283».

[22] «ГОСТ 23337-78 Шум. Методы измерения шума».

[23] «ГОСТ 12.1.003 Система стандартов безопасности Шум».

[24] «ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 - Настанова з розрахунку».

[25] «ДЕРЖАВНІ БУДІВЕЛЬНІ НОРМИ УКРАЇНИ».

[26] «Environmental Noise Directive». https://environment.ec.europa.eu/topics/noise/environmental-noise-directive_en (дата звернення 24, Квітень 2023).

[27] «Про стандартизацію», Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/go/1315-18> (дата звернення 24, Квітень 2023).

[28] «Правовий статус державних стандартів, ДСТУ і ТУ», Юридическая компания “Правова допомога”. <https://pravdop.com/publications/kommentarii-zakonodatelstva/pravovoy-status-gosudarstvennih-standartov-gstu-i-tu/> (дата звернення 24, Квітень 2023).

[29] «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/go/4004-12> (дата звернення 24, Квітень 2023).

[30] «ДБН В.1.1-31:2013_Захист територій, будинків і споруд від шуму».

[31] «Wi-Fi products | TI.com». <https://www.ti.com/wireless-connectivity/wi-fi/overview.html> (дата звернення 21, Травень 2023).

[32] «AN1142: Mesh Network Performance Comparison».

[33] «PAN1780 Series». <https://na.industrial.panasonic.com/products/wireless-connectivity/bluetooth/lineup/bluetooth-low-energy/series/128560> (дата звернення 21, Травень 2023).

[34] «Superlux - ECM999». <http://www.superlux.com.tw/productInfo.do?pdctid=bbda8de8-e59f-4ad8-bc47-56ad09db2929&pdkid=47e141eb-867b-4aac-b9b3-8c71cc50a785&level=2&lv0=1> (дата звернення 24, Травень 2023).

[35] «Differential signalling», Wikipedia. 20, Лютий 2023. Дата звернення: 13, Червень 2023. [Online]. Доступний у: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Differential_signalling&oldid=1140569670

[36] «Low-pass filter», Wikipedia. 10, Червень 2023. Дата звернення: 13, Червень 2023. [Online]. Доступний у: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Low-pass_filter&oldid=1159498281

[37] «Расчёт пассивных RC фильтров. Онлайн калькулятор.» <https://vpryaem.ru/information2.html> (дата звернення 13, Червень 2023).

[38] «Завдання на розрахунково-графічну роботу».

[39] «Instrumentation amplifier», Wikipedia. 27, Травень 2023. Дата звернення: 13, Червень 2023. [Online]. Доступний у: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Instrumentation_amplifier&oldid=1157281376

[40] «Операційний підсилювач — Вікіпедія». <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D0>

%B9%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D1%96%D0%B4%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D1%87 (дата звернення 13, Червень 2023).

[41] «Цифровые фильтры на микроконтроллере - презентация онлайн». //ppt-online.org/6763 (дата звернення 08, Червень 2023).

[42] «Фильтр с конечной импульсной характеристикой», *Википедия*. 16, Лютий 2018. Дата звернення: 07, Червень 2023. [Online]. Доступний у:
https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80_%D1%81_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B9&oldid=90959089

[43] «Фильтр с бесконечной импульсной характеристикой», *Википедия*. 05, Березень 2023. Дата звернення: 07, Червень 2023. [Online]. Доступний у:
https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80_%D1%81_%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B9&oldid=129056421

[44] «Phantom power - Wikipedia». https://en.wikipedia.org/wiki/Phantom_power (дата звернення 04, Червень 2023).

[45] «Фантомное питание», *Википедия*. 21, Квітень 2023. Дата звернення: 04, Червень 2023. [Online]. Доступний у:
https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A4%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5&oldid=129962913

[46] Г. С.А, *Искусство схемотехники. Просто о сложном*. Издательство «Наука и Техника», 2011. Дата звернення: 22, Листопад 2022. [Online]. Доступний у:
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=0e2c6967640ba9980bb30509de60d9ab>

[47] A. Agarwal i J. Lang, *Foundations of analog and digital electronic circuits*, 1ий вид. в The Morgan Kaufmann series in computer architecture and design. Elsevier / Morgan Kaufmann, 2005. Дата звернення: 22, Вересень 2022. [Online]. Доступний у:
<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=798a2bcf982a53df766ced0b67b262b8>

[48] I. Grešovnik, «Sound Level Meter - Development of Signal Processing Algorithms».