МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра електроніки і комп’ютерної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфкаційної роботи бакалавра

«ПРОГРАМОВАНИЙ ГІТАРНИЙ ПРОЦЕСОР ЗВУКОВИХ ЕФЕКТІВ»

Завідуючий кафедрою Опанасюк А.С.
Керівник роботи Бережна О.В.
Студент групи ЕС-81
Мороз Н.В.

СУМИ
2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Електроніки та Інформаційні Технології

Кафедра електроніки та інформаційних технологій

Напрям підготовки 171 електроніка

Освітня програма електронні системи та компоненти

Освітній ступень бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Опанасюк А.С.

підпис ініціали та прізвище

« » 2022 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Мороз Нікіта Володимирович

1. Тема роботи **ПРОГРАМОВАНИЙ ГІТАРНИЙ ПРОЦЕСОР ЗВУКОВИХ ЕФЕКТІВ**

затверджено наказом ЗВО від « 12 » квітня 2022 р. № 0242-VI

2. Термін подання студентом закінченої роботи **11.06.2022**

3. Вихідні дані проекту: пристрій «програмований гітарний процесор ефектів», що використовує вхідний аналоговий сигнал для його модифікації на шляху від джерела звуку до вихідної акустичної системи чи гучномовця, напруга живлення системи 4.2-19В, напруга живлення мікросхем системи 3.7-5В допустима температура роботи -5+80*С.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Перелік скорочень та умовних позначень; вступ; огляд літератури та постановка задачі проектування; розроблення, обґрунтування алгоритму функціонування та структурної схеми пристрою, що проектується; Розрахунки принципових елкутричних схем вузлів і блоків пристрою; Розроблення принципових електричних схем вузлів і блоків пристрою; вибір елементної бази, синтез та розрахунки основних електричних вузлів пристрою; вибір та розроблення алгоритму; Література; додаток А.

5. Перелік графічного матеріалу: схема алгоритму, схема електрична структурна, схема електрична принципова.

Календарний план

№ п/пс	Найменування етапів дипломного проекту(роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд тех. літератури.	31.01.2022	
2	Розробка алгоритму функціонування та структурної схеми пристрою.	15.02.2022	
3	Розрахунок вузлів та блоків пристрою та розробка схеми електричної принципової	20.03.2022	
4	Оформлення графічної частини.	01.04.2022	
5	Оформлення пояснювальної записки.	15.05.2022	
6	Рецензування та підготовка до захисту	05.06.2022	

Студент-дипломник _____

Керівник проекту _____

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 40 аркушів, 20 рисунків, 7 таблиць, 38 джерел літератури.

Графічна частина роботи містить: схему алгоритму роботи пристрою, структурну та принципову електричні схеми, вибір та розроблення алгоритмів.

Пояснювальна записка містить чотири розділи: огляд літератури і постановку завдання проектування, розробку структурної схеми пристрою та алгоритму його функціонування, розробку функціональної та принципової схем пристрою.

Перший розділ містить загальну інформацію про цифрові процесори сигналу, їх призначення, основні функції та види, а також постановку завдання на проектування.

Другий розділ присвячений розробці алгоритму функціонування та структурної схеми проектованого пристрою.

Третій розділ присвячений розробці функціональної та принципової схем пристрою.

Четвертий розділ присвячено програмному забезпеченню пристрою, що емулюватиме мікроконтролер.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 6

ВСТУП 7

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ 8

1.1 Обґрунтування алгоритму функціонування та структурної схеми пристрою, що проектується. 11

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ І СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ ... 16

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ВУЗЛІВ І БЛОКІВ ПРИСТРОЮ 19

3.1 Вибір елементної бази, синтез та розрахунки основних електронних вузлів пристрою 22

4 Розроблення програмного забезпечення пристрою, що проектується. 29

ВИСНОВКИ 35

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 36

Додаток А 38

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ОП – операційний підсилювач

R_n / C_n - найменування елементу за номером

МК – мікроконтролер

АС – аналоговий сигнал

ЦС – цифровий сигнал

ПКЕ – пристрій керування ефектами

Прошивка – програмний код, що записується у пам’ять мікроконтролера та емулює ефект гітарної педалі

АКБ – акумуляторна батарея для живлення приладу

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

БТ – біполярний транзистор

ССЕ – схема зі спільним емітером

ВСТУП

Сучасний ринок напівпровідникової аудіоелектроніки налічує безліч представників різних як цінових, так і якісних ніш. З розрахунком того, що навіть найсучасніші контролери ефектів не завжди використовують свій повний потенціал через очевидну фінансову вигоду, з'являється питання стосовно необхідності використання універсальної чи здатної до перепрограмування педалі ефектів.

У результаті науково-технічного прогресу зросли потреби на використання багатофункціонального апаратного забезпечення в музичній індустріїв. В основі технології ПЛІС-звукотворення лежить звична нам звукова карта, тобто АЦП-ЦАП, що ми маємо в кожному персональному комп'ютері, смартфоні чи іншому електронному пристрої. Її задача – оцифровування та опрацювання сигналу з подальшим його відтворенням. В акустиці використовують дуже простий патерн роботи, що втілюють вже достатньо давно, а саме розбиття вхідного аналогового сигналу завдяки широтно-імпульсній модуляції(робота підсилювачів Д-класу) чи ШІМ для спрощення, а після опрацювання сигналу на підсилюючих каскадах і мікросхемах його перетворюють назад у синусоїдальні коливання, але з певним ступенем дискретизації. Чим він вищій, тим чіткіше передається підсилений початковий сигнал.

Зважаючи на дефіцит напівпровидникових, а саме кремнієвих виробів в сучасному світі, питання пошуку альтернатив за звукотворенням стає все бульш важливим. Потрібні вироби, що мають високу надійність, відносну простоту виконання, доступність та простоту у використанні.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПРОЕКТУВАННЯ

В сучасному світі існує багате різноманіття гітарних музичних ефектів та процесорів, що використовуються музикантами у повсякденному житті. Вони різняться за принципами роботи, складністю створення, необхідністю додаткової фільтрації сигналу як на вході пристрою, так і на виході, та багатьма іншими особливостями. В основі роботи таких пристроїв лежать прості схеми, з яких починалось сучасне створення модифікованого звуку.

Ми можемо точно виділити такі ефекти, як ехо (Реверберація), модуляція (Хорус), перевантаження (Дісторшн), підсилювач частот (Бустер), послідовний дублікатор сигналу (Тремоло) та багато інших. Зазвичай, деякі з них комбінують для криса досягнення певного звучання, тому існує нескінченна кількість комплексних педалей ефектів, що користуються значною популярністю. Так, наприклад, є ефект Фузз – комбінація Дісторшну та Бусту(використовують саме ті частоти, що утворюють спектр басових звуків (16 – 120 Гц)[1].

Для створення ефектів використовують спеціалізовані мікросхеми, лампові або транзисторні структури на біполярних транзисторах (далі БТ). У будь-якому випадку, під час збірки схем використовують усім відомі базові компоненти, такі як звичайні малопотужні постійні резистори, підстроювальні та змінні резистори, полярні та неполярні конденсатори, рідше змінні конденсатори, діоди та ін.

Історично одним з перших був створений так званий «ефект перевантаження», також відомий як Дісторшн чи Фузз.

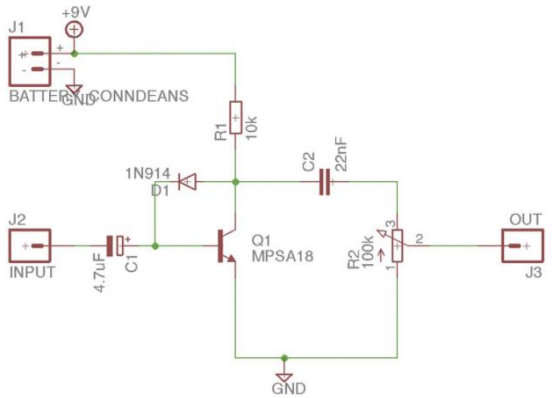

Рис.1 – Функціональна схема простого аудіоефекту Дісторшн(Фуза)

В даному випадку ми маємо:

- Джерело живлення транзисторного каскаду ССЕ на npn БТ 9В;
- Резистор 10 кОм для встановлення струму колектор-емітер;
- Змінний резистор на 100 кОм для регулювання гучності;
- Полярний конденсатор на 4.7 мкФ як вхідний фільтр, що прибирає постійну складову вхідного сигналу;
- Неполярний конденсатор на 22 нФ як вихідний фільтр постійної складової;
- Транзистор малої потужності для підсилення сигналу;
- Діод для встановлення струму бази та відкриття транзистора[2].

В сучасних пристроях використовуються ті ж самі патерни створення приладів, але вони мають багато ступенів перетворення, фільтрації та стабілізації. Для функціонування приладу, що було задумано, потрібно, щоб він задовольняв певні критерії для стабільної роботи:

- Стабільність живлення з можливістю автоматичної стабілізації та мінімальною пульсацією в самому пристрої;
- Надійність в роботі;
- Захист від пробою напруги під час використання не в домашніх умовах;
- Якщо йдеться про процесор ефектів, а не про один ефект на пристрій, то необхідно виділити достатньо пам’яті;
- Визначити та забезпечити максимальну можливу вихідну потужність сигналу у випадку, якщо не передбачено подальшого підсилення;
- Запобігти перегріву основної робочої мікросхеми;
- Значний вхідний та малий вихідний імпеданс.

З урахуванням перелічених вимог, можна зробити перелік необхідних характеристик для створення повноцінного процесору ефектів з чи без можливості перезапису нової прошивки(програмного коду, що емулює ефект), а саме:

- Робоча частота перемикання транзисторів у елементах ПЛІС – 16 МГц;
- Оперативна пам’ять для ефектів з потребою в запам’ятовуванні коротких проміжків сигналу – 2+ Кб RAM;
- АЦП на 8+ біт(вхід та вихід);

- Енергонезалежна пам'ять – 16+ Кб.

Прикладом такого пристрою служить Mooer GemBox – один з найбільш популярних представників серед бюджетних педалей-мультиефектів.

Всередині нього ми маємо:

- Робоча частота перемикання транзисторів – 16 МГц;
- Оперативна пам’ять – 2 Кб;
- АЦП на 8 біт;
- Вихідний каскад(розрядів) 8 біт;
- Енергонезалежна пам’ять – 32 Кб;
- Додаткові перемикачі параметрів, такі як енкодер для підстроювання кожного окремого параметра звучання, педаль експрессіє, що працює за принципом резистора(повністю активована – R–>0, інакше R–>1 МОм чи більше);
- Вхідний імпеданс Zвх = 0.3 Мом, Zвих = 0.1 Ом;
- Живлення 9В(однополярне)[3].

Незважаючи на достатню багатий перелік доступних ефектів для використання, можливість додаткової частотної фільтрації в межах чутності вуха, дешевизну та доступність, даний представник має певні недоліки. Головний з них – неможливість повноцінно перепрограмувати контролер без втрати функціонування частини його елементів, оскільки запрограмовані ефекти все ж таки обмежені за функціональністю, а деякі мають звучання, що не влаштовує користувача. З приводу цього і було створено проект перепрограмовувального процесору гітарних ефектів[4].

1.1 Обґрунтування алгоритму функціонування та структурної схеми пристрою, що проектується.

В моєму проекті використовуватиметься так званий підсилювач Д-класу на базі АЦП. Цей клас підсилювачів з'явився відносно нещодавно у порівнянні з іншими. У пристроях подібного типу використовується цифрова обробка аудіо сигналу й спеціальні імпульсні блоки живлення. Удосконалена конструкція й найсучасніші технології обробки звуку дозволили отримати потужний підсилювач звуку в компактному розмірі та малій вазі.

В класичному підсилювачі транзистори на виході подають безперервний сигнал. При цьому в них на лінійних виходах відзначається досить велике розсіювання потужності. А ось в пристроях класу D потужність майже не розсіюється, а значить і не втрачається. Ця властивість розширює можливості використання підсилювачів цього типу. Пояснюється це тим, що мале розсіювання потужності сприяє тому, що схема майже не нагрівається, а також дає можливість економити місце на платі. Все це не тільки знижує кінцеву вартість продукту, але збільшує час автономної роботи[5].

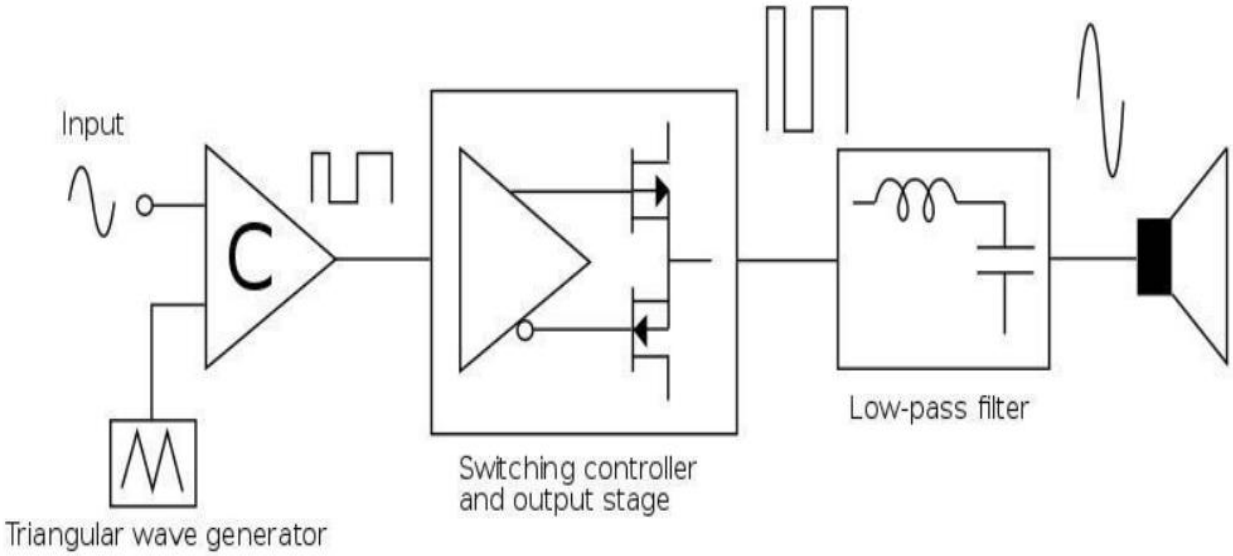

Рис.2 – Функціональна схема роботи підсилювача Д-класу

В основі схемотехніки класу D лежить генератор НВЧ-імпульсів (обчислюваних сотнями МГц) несучої частоти і компаратор - пристрій, що модулюють ці імпульси, відповідно до форми вхідного аналогового сигналу.

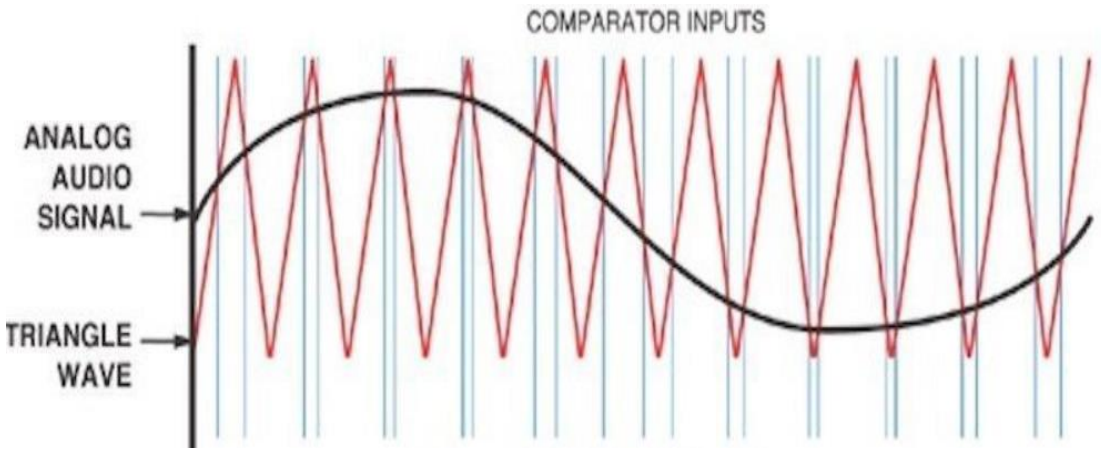

Рис.3 – Перетворення вхідного аналогового сигналу у цифровий за допомогою ОП у режимі компаратору за підключення одного з входів компаратору до генератора трикутного синусоподібного сигналу, Рисажене у вигляді часової діаграми[6][7]

Далі все просто. Модульований сигнал має форму імпульсів рівної амплітуди, але різної тривалості, що посилюються за допомогою пари симетрично включених швидкодіючих транзисторів типу MOSFET.

Далі у схемі використовується найпростіший LC-фільтр, що демодулює посилений сигнал, а також відсікає несучу частоту і супутній високочастотний шум.

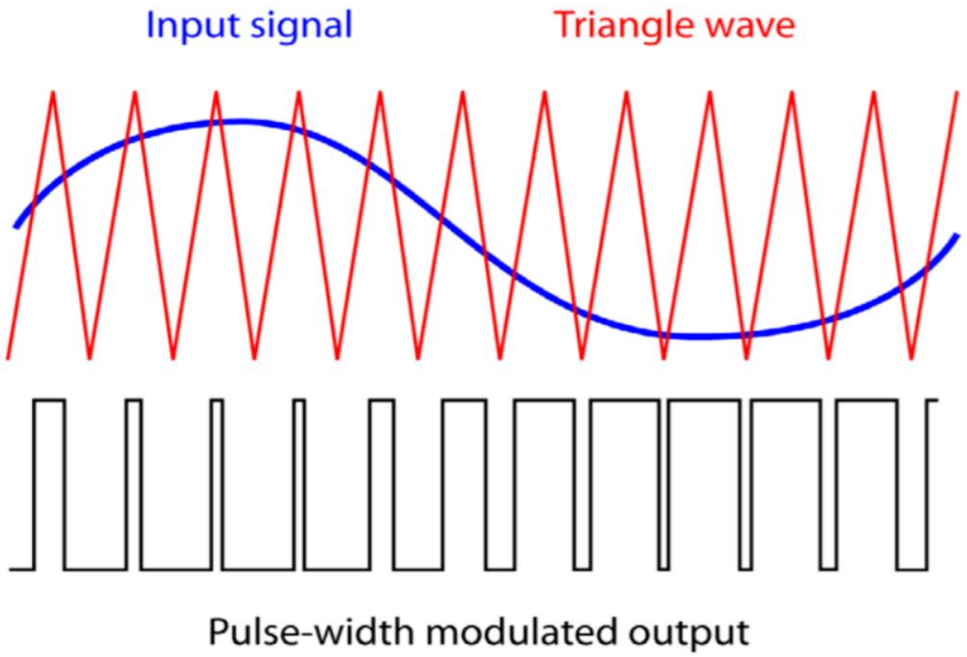

Рис. 4 – Принцип роботи ШІМ у підсилювачі Д-класу
(Загальний вид перетворення аналогового сигналу у цифровий синусоїда - ШІМ)

Однак, беручі до уваги існуючі методи побудови підсилювальних каскадів та підсилювачів з транзисторів, породжує резонне питання: «а чи не простіше було б відразу посилити аналоговий сигнал без будь-яких модуляцій?». І саме це питання розкриває суть підсилювачів класу D.

У звичайних підсилювачах класів A, B, C та інших похідних транзистор працює з широкосмуговим сигналом, що постійно змінюється і по амплітуді, і по частоті. Поведінка навіть найкращого транзистора на різних амплітудах і частотах не 100% однакова, що неминуче призводить до спотворень, які ми знаємо як забарвлення або характер підсилювача. Модульований сигнал у підсилювачах класу D змінюється дискретно та на повну амплітуду.

Таким чином, режим роботи транзисторів істотно спрощується і стає набагато прогнозованішим. По суті, вони виступають у ролі ключа, перебуваючи або у закритому, або у відкритому стані без проміжних значень.

Також варто відзначити, що вони можуть посилювати цифровий сигнал без його перетворення в аналоговий. Ця технологія застосовується, якщо аудіосигнал вже подається на пристрій в цифровому вигляді.

Одною з головних переваг підсилювачів звуку класу D є високий ККД — від 85 до 95% без втрати якості. Цей показник досягається завдяки тому, що амплітуда імпульсів майже дорівнює показнику напруги живлення, тому на вихідних транзисторах втрати потужності дуже незначні. При цьому перешкоди і спотворення при передачі звуку також відносно невеликі.

Як бачимо, клас підсилювача звуку багато в чому визначає його робочі характеристики та якість звуковідтворення. І його обов'язково треба враховувати при виборі пристрою, щоб отримати оптимальний результат в підсумку, після підключення всього звукового обладнання.

Однок, у таких систем підсилення є певні, хоча і не завжди важливі недоліки. Так, наприклад, наявність кварцевого резонатору як генератора коливань для роботи ШІМ-модулятора призводить до можливих електромагнітних шумів, що негативно впливає не тільки на звучання, а й на працездатність та надійність усього пристрою вцілому. Такі параметри зазвичай враховуються під час виробництва і нівелюються різноманітними фільтрами та стабілізаторами, що не може не ускладнити процес виготовлення та цінник для потенційних користувачей[8].

Високий ККД підсилювачів класу D став причиною однієї специфічної

особливості: високої залежності якості та характеру звучання від блоку живлення. Якщо виробник вирішить використовувати імпульсне джерело живлення і не перейметься достатньою кількістю фільтруючих схем, частина шумів обов'язково проникне в динамік і зіпсує враження від звучання. Поганий блок живлення, звичайно, і класу АВ на користь не піде, але саме в класі D ця проблема проявляється найгостріше.[9]

Отже, ми маємо відправну точку – підсилювач Д-класу, побудований на базі мікроконтролера. Він прийматиме аналоговий сигнал, що проходитиме через простий фільтр пульсації, лишаючи нам тільки змінну складову аналогового(гітарного) сигналу. Після цього отриманий сигнал опрацьовуватиметься програмним кодом, що перетворить його з амплітуди змінної напруги на ШІМ-модульований сигнал з високою ступінню дискретизації, після чого на нього буде «накладено» звуковий емульований ефект, повернено до аналогового виду шляхом оберненої ШІМ-одуляції, а вже після того відправлено на вихід підсилювача до подальшихх фільтрів відповідно до виходу на

Потрібно також врахувати те, що вхідний та вихідний сигнал схилен до затухання через розповсюдження по довгим з’єднувальним кабелям від гітари до пристрою, а після – від пристрою до відтворювального підсилювача, що є кінечною точкою на шляху сигналу. Враховуючи це потрібно розглянути максимальні(або критичні) можливості обраного мікроконтролера Atmega328.

Ми маємо наступні максимальні характеристики:

По току та напрузі споживаний струм за 1 МГц, 1.8 – 5В, 25 °C на один вхід-вихід:

- Активний режим: 0.2 мА
- Режим відключення: 0.1 мкА
- Режим енергозбереження: 0.75 мкА (включаючи 32 кГц RTC)

За підвищеної температури роботи максимальний струм збульшується до 0.4 мА

Можемо зробити висновок, що приблизна максимальна потужність на один вхід-вихід буде:

$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max}$$

де максимальна вихідна напруга $= 5\text{В}$, а максимальний вихідний струм $= 0.4$ мА

$$P_{max} = 5 \cdot 0.4 \cdot 0.001 = 0.002 \text{ Вт} = 2 \text{ мВт}$$

Цього недостатньо для подальшого розповсюджування сигналу по з'єднуючих проводах, тому доцільно буде вбудувати у схему підсилювач сигналу. Нема гострої потреби у тому, щоб підсилювати обидва вхідний і вихідний сигнали з мікроконтролера, достатньо лише вихідний, але для підвищення якості початкової дискретизації сигналу ми можемо використати ОП[2][10].

Таким чином, потрібно додати на вхід та вихід пристрою мікросхему – здвоєний ОП.

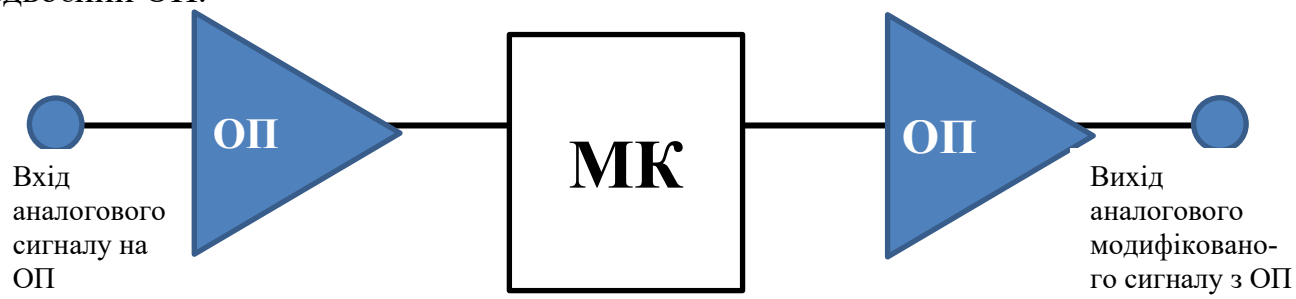

Рис.5 – Спрощена структурна схема роботи приладу, що розробляється.

Ми повинні обрати такі параметри підсилення, щоб коефіцієнт підсилення був від К=500 на вході і від К=1000 на виході. Таким чином ми отримуємо P`max = K*Pmax = (за К=1000) 1000*2 мВт = 2 Вт.

Такого результату достатньо для того, щоб задовольнити потреби в потужності для подачі достатнього рівня сигналу по з'єднуючим проводам.

Отже, на даний момент структурна схема приладу гітарного ефекту виглядає наступним чином[11]:

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ І СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ПРИСТРОЮ

В техніці апаратна архітектура відноситься до ідентифікації фізичних компонентів системи та їх взаємозв'язків. Цей опис, який часто називають моделлю апаратного проектування, дозволяє розробникам апаратних засобів зрозуміти, як їх компоненти вписуються в архітектуру системи, і надає розробникам програмних компонентів важливу інформацію, необхідну для розробки та інтеграції програмного забезпечення. Чітке визначення апаратної архітектури дозволяє різним традиційним інженерним дисциплінам (наприклад, електротехніці та машинобудуванню) ефективніше співпрацювати над розробкою та виробництвом нових машин, пристроїв та компонентів.[12]

Перш за все система запитує сигнал живлення, що надходить до усіх відповідних блоків, де необхідно. Саме це повинно слугувати початковою точкою в роботі, тому що без стабільного живлення жодний з контурів не працюватиме.

Наступним кроком йде опитування наявності аудіо(аналогового) сигналу від джерела. Якщо сигнал є, то переходимо до наступного кроку, якщо ні – вмикається режим очікування системи[12][13].

На етапі наявності напруги живлення та аналогового сигналу спрацьовує алгоритм, за яким першочергово відбувається підсилення аналогового сигналу, його фільтрація від зайвих шумів.

Далі маємо дискретизацію сигналу для перетворення його на зрозумілий МК сигнал даних, тобто бінарний шифрований код у вигляді ШІМ.

В пам'яті МК записана програма, що форматує сигнал та передає його на наступний блок, де має місце зворотня ШІМ-модуляція.

Останні кроки – це додаткове підсилення та фільтрація отриманого сигналу з його подальшою передачею на гучномовці чи інші підсилювальні системи.

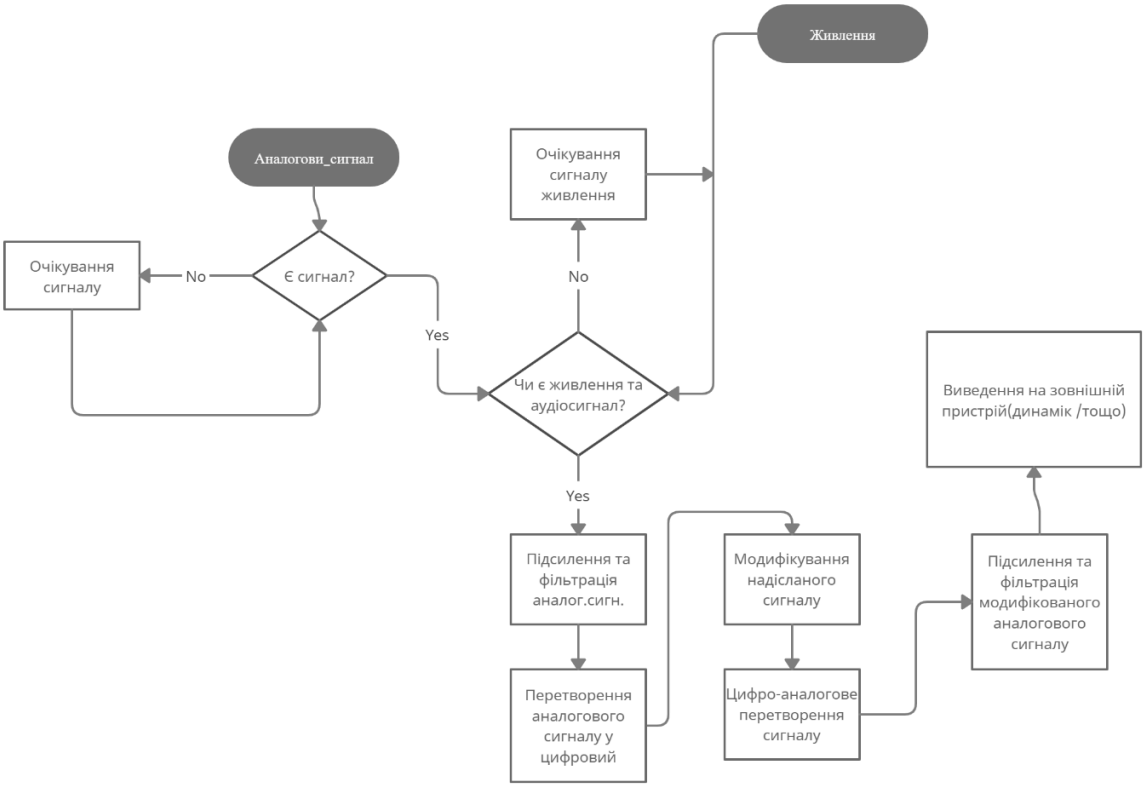

Рис. 6 – Схема алгоритму роботи пристрою, що описується

Таким чином ми можемо отримати структурну схему пристрою, що проектується. Живлення в залежності від зовнішнього джерела подаватиметься від 5 до 12 В. Далі ця напруга подається на блок стабілізації робочої напруги, яким слідує обмежувач за струмом, щоб піковий струм в імпульсі або під час наявності підвищеної його величини. Це дозволить викреслити перенавантаження з переліку небезпечних станів основного мікроконтролера.

Паралельно з цим подаватиметься сигнал через підсилювач та фільтр до аналогового приймача мікроконтролера, що перетворюватиме його завдяки ШІМ, а далі в залежності від прошивки, що записується перед цим в пам’ять МК через USB-порт та проходить конвертацію у зрозумілі команди ТТЛ-логіки, модифікує вхідний сигнал.

Наступним кроком буде зворотня ШІМ, що утворює синусоподібний сигнал, який далі проходить через вихідний підсилювальний фільтр.

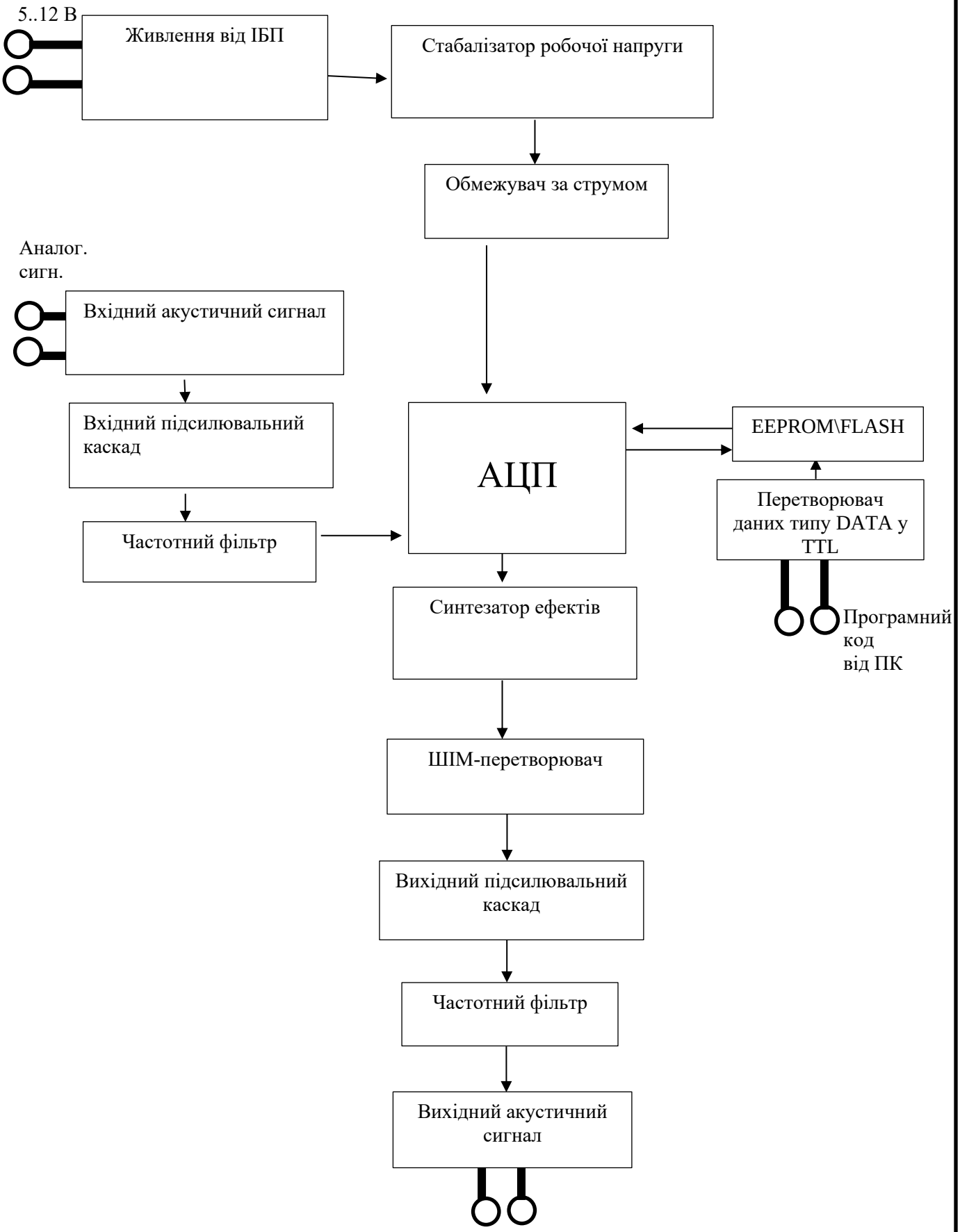

Рис. 7 – Структурна схема пристрою

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ВУЗЛІВ І БЛОКІВ ПРИСТРОЮ

П’ятивольтове живлення подається на стабілізатор напруги, побудований на компараторі, після чого напруга йде на «плюсу» мікроконтролера. Відповідно до законів електрики та електроніки, струм – це направлений рух заряджених часток, що рухаються від області з їх високою концентрацію у область з низкою концентрацією. Тобто від мінуса живлення на мінус МК, потім від мінуса МК до плюса МК, а після – до плюса живлення, однак для простоти спеціалісти умовно використовують шлях проходження струму від плюса живлення до мінуса живлення. Блок стабілізації вхідної напруги відповідає за створення нормованого постійного сигналу 5В, що живить весь пристрій. Для конструкційного спрощення доцільніше використовувати стабілізатор напруги на мікросхемах, аніж на транзисторних каскадах завдяки високому ККД та добротності.

Також, постійна напруга подається на генератор робочої частоти МК, перетворюючи частину постійної напруги у змінну завдяки інвертору напруги. Існує кілька принципів створення такого генератору. Найпростішим є паралельне з’єднання конденсатору та котушки індуктивності з періодичним зарядом контуру. [14]

Розглянемо ідеальний коливальний контур(енергія в контурі = const):

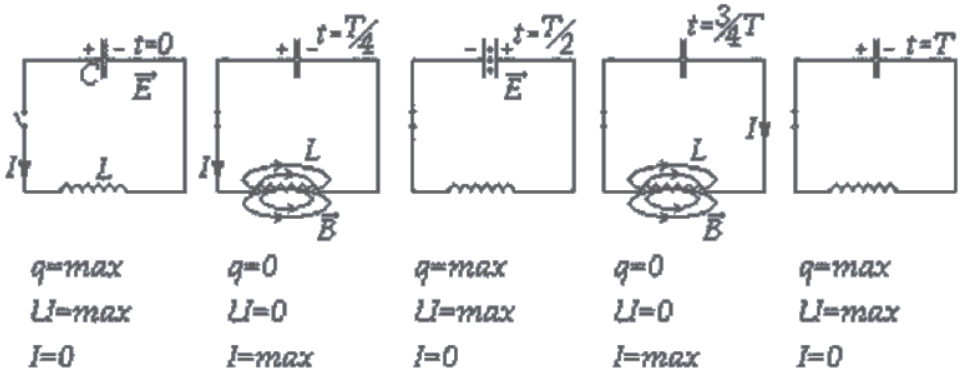

Рис. 8 – Принцип роботи електричного резонатору(інвертору напруги/струму)

В початковий момент часу ми замикаємо «ключ» контуру, конденсатор заряджений, а котушка індуктивності (КІ) розряджена. Перша чверть періоду – конденсатор працює як джерело струму(напруги), що починає спадати на КІ, утворюючи в ньому магнітне поле. Половина періоду – ЕРС на котушці, що

тепер є джерелом струму(напруги), створює струм в колі, що заряджає конденсатор. Це половина циклу роботи контуру, друга повністю повторює першу.

В цій схемі вимикач можна замінити перемикач на резистор, що працюватиме як навантаження. В початковий момент часу заряджається конденсатор, а після схема працює по наведеному вище патерну.

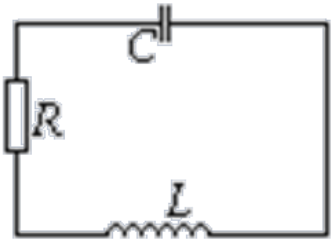

Рис. 9 – Електричний резонатор з навантажувальним резистором

Однак, використовуючи тільки LC-контур, ми стикаємося з такими проблемами, як затухання коливань.

Для того, щоб виникли в системі коливання могли продовжуватися довгий час, необхідне джерело енергії, причому поведінка цього джерела має регулюватися коливальною системою, тобто. від джерела має відбиратися рівно стільки енергії, скільки її було втрачено системою. Такий пристрій називається авто коливальною системою.

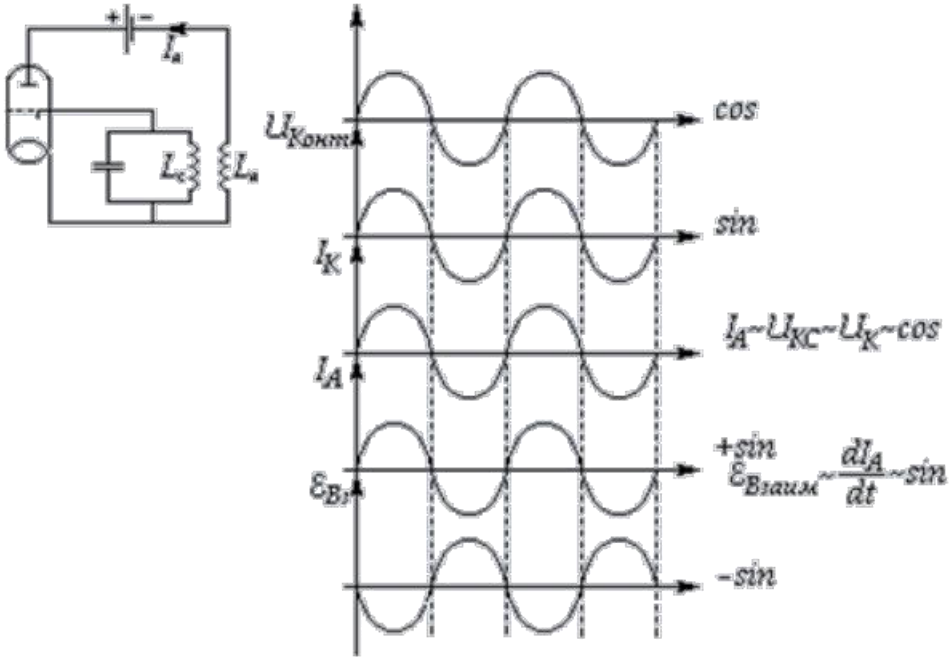

Рис. 10 – Принципова схема та часові діаграми роботи автоматичної

коливальної системи на вакумному триоді.

Таким чином, ми підходимо до використання одного з найбільш сучасних методів створення резонаторів електросистем – до використання кварцевого резонатору.

Кварцовий резонатор - це радіоелемент, який використовується в радіотехнічних ланцюгах для створення електричних коливань.

Чому саме кварцевий резонатор (КР)?

Кварц – це один із найпоширеніших мінералів у земній корі. Його частка становить близько 60%! Якщо напівпровідникові радіокомпоненти переважно роблять із кремнію, то кварц теж складається з кремнію але у зв'язці з киснем. Його хімічна формула є SiO2. Їх використання достатньо вигідно з фінансової точки зору[3][15][16].

В 19 столітті два брати Кюрі виявили цікаву властивість деяких твердих кристалів генерувати ЕРС, деформуючи ці кристали. Деформація - це зміна форми будь-якого тіла за допомогою кручення, удару, розтягу тощо. Так ось, ударяючи по таких кристалах, вони виявили, що ті можуть видавати якесь короткочасне напруження. Але вони також виявили ще зворотний ефект. При подачі напруги на такі кристали ці кристали деформувалися самі. Неозброєним оком це було майже непомітно. Такий ефект назвали п'єзоефектом, а речовини – п'єзоелектриками.

Кварцовий резонатор в електроніці — це радіоелемент, який здатний резонувати, якщо на нього подати змінний струм певної частоти та форми.

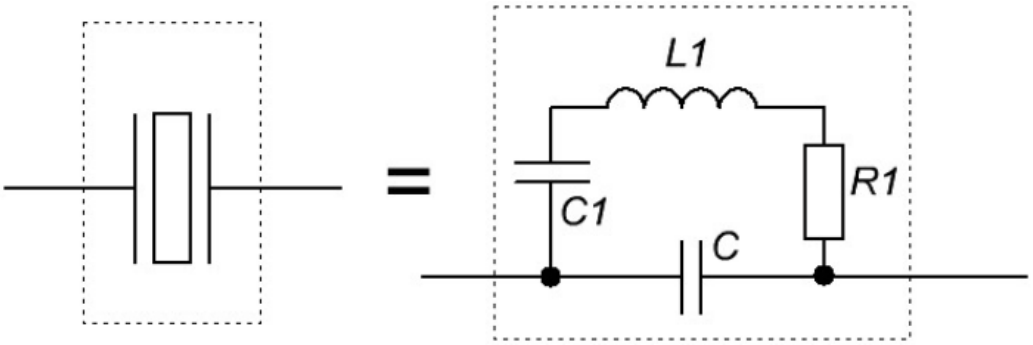

Рис.11 – Еквівалентна схема КР

КР має переваги перед «громіздкими» схемами резонаторів завдяки досягненню набагато більших значень добротності (10^4-10^6) еквівалентного коливального контуру, ніж будь-яким іншим способом, мінімальних розмірів пристрою (аж до часток міліметра) та високою температурною стабільністю.

3.1 Вибір елементної бази, синтез та розрахунки основних електронних вузлів пристрою

Стосовно самого МК, то, беручі до уваги параметри, зазначені у першому розділі, а саме:

- Стабільність живлення з можливістю автоматичної стабілізації та мінімальною пульсацією в самому пристрої;
- Надійність в роботі;
- Захист від пробою напруги під час використання не в домашніх умовах;
- Якщо йдеться про процесор ефектів, а не про один ефект на пристрій, то необхідно виділити достатньо пам’яті;
- Визначити та забезпечити максимальну можливу вихідну потужність сигналу у випадку, якщо не передбачено подальшого підсилення;
- Запобігти перегріву основної робочої мікросхеми;
- Значний вхідний та малий вихідний імпеданс,
- Робоча частота перемикання транзисторів у елементах ПЛІС – 16+ МГц;
- Оперативна пам’ять для ефектів з потребою в запам’ятовуванні коротких проміжків сигналу – 2+ Кб RAM;
- АЦП на 8+ біт(вхід та вихід);
- Енергонезалежна пам'ять – 16+ Кб [18],

можемо обрати мікроконтролер з сімейства Atmega чи STM через їх простоту у використанні та доступність з надійністю.

Atmega328	STM32
• Архітектура AVR • Напруга живлення плати 3,35 – 12 В (бажано 5 В) • Тактова частота 8 МГц або 16 МГц • Об'єм оперативної пам'яті (SRAM) 2 кбайт • Об'єм пам'яті програм (FLASH) 32 кбайт • Об'єм енергонезалежної пам'яті (EEPROM) 1 кбайт • Аналогові входи: 6 входів • Максимально-допустимий струм цифрового виходу 40 мА (сумарний струм виводів не більше 200 мА)	• Архітектура ARM Cotrex M3 • Напруга живлення плати 3,35 – 12 В (бажано 5 В) • Розрядність 32 Біт • Тактова частота 8/16 МГц • Об'єм пам'яті програм (FLASH) 128 кБайт • Об'єм пам'яті данных (RAM): 20 кБайт • Максимально-допустимий струм цифрового виходу 50 мА (сумарний струм виводів не більше 200 мА) **В складі мікроконтролерного модуля** • Виводи: 37

В складі мікроконтролерного модуля • Виводи: 20 • UART: 2 • SPI: 4 • I2C: 2 • Опорна напруга 5В та 3.3В • Дискретні входи/виходи: 14 (6 можуть бути використані для генерації ШІМ сигналів)	• UART: 3 • SPI: 2 • I2C: 2 • CAN: 1 • USB: 1 • Опорна напруга 5В та 3.3В • 8 дискретних виходів можуть бути використані для генерації ШІМ сигналів)

Як можна побачити, обидва варіанти мають свої певні переваги та задовольняють параметри використання, тому можна вибрати будь-який МК. В даній роботі вибираю Atmega328(TQFP-32). Для повноцінної роботи мікроконтролера потрібно використати кварцевий резонатор на 8/16 МГц.

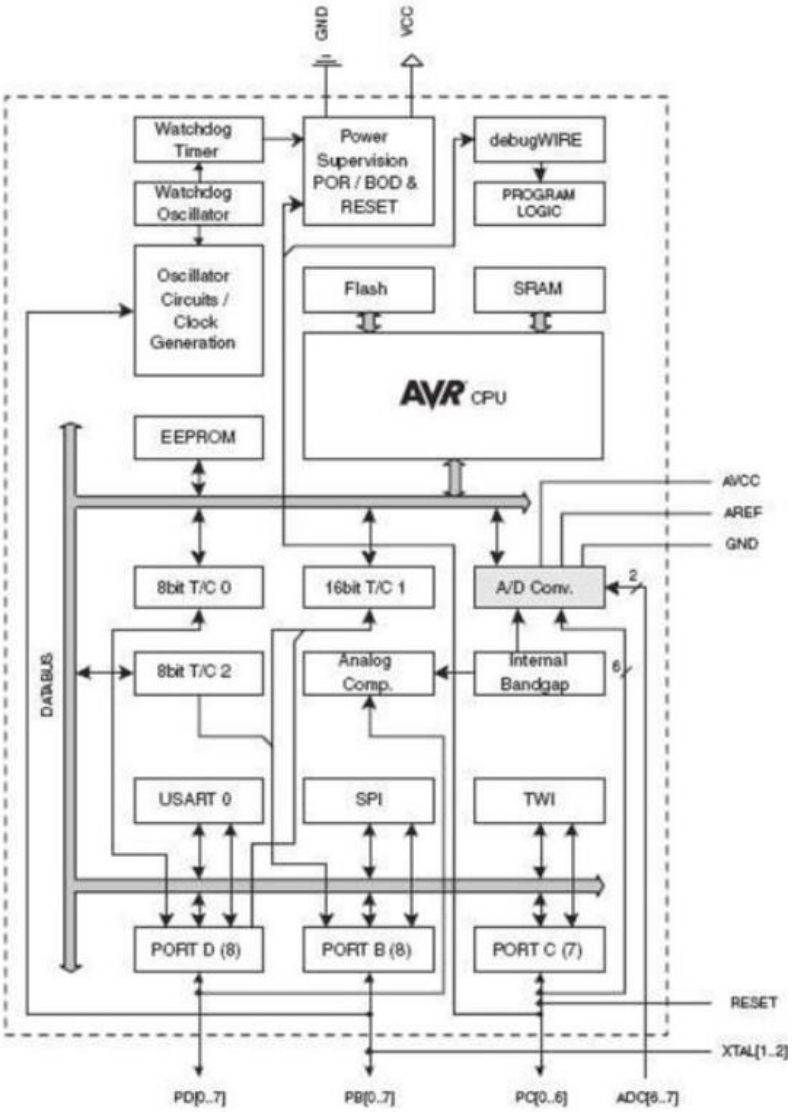

Рис. 12 – Структурна схема Atmega328

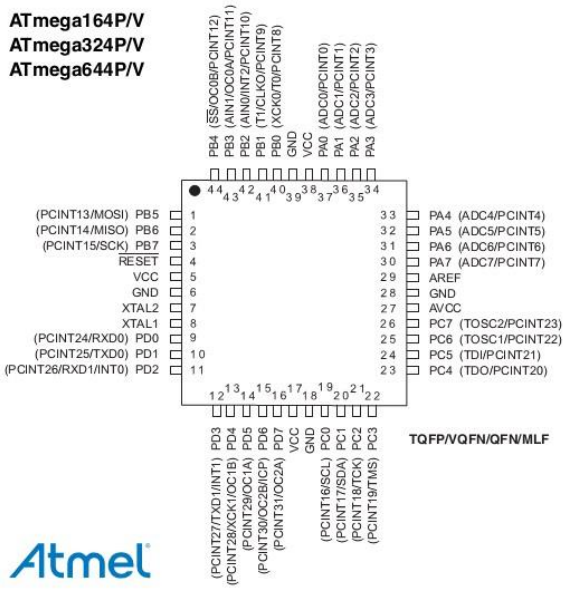

Рис. 13 – Піни МК Atmega328 TQFP-32

(монтажна схема МК)

Стосовно отримання/передавання та фільтрації сигналу, пропонується наступне рішення:

1. В якості підсилюючого елементу із спрощеним зворотнім зв’язком ми використовуватимемо мікросхему зі здвоєним ОП JRC4558(аналог OPA2134), що часто використовують серед музикантів під час конструювання музичного обладнання[20][22].
2. Вхідний фільтр в даному випадку – це фільтр верхніх частот та верхніх частот. Резистор на 1 Мом впроваджено для «підтяжки» напруги з вхідного контакту. Таким чином, стабілізується спад напруги вхідного сигналу на шляху до неінверсивного входу ОП.
3. Конденсатор C1 позбавляє сигнал постійної складової.
4. Через резистор R2 ми подаємо опорну напругу 2.5В на ОП. Вихідна напруга зсуву - це напруга на виході ОУ щодо "землі" або загальної точки схеми за умови, що диференціальна вхідна напруга дорівнює нулю. Операційні підсилювачі конструюються так, щоб ця напруга дорівнювала нулю, однак точно виконати цю умову неможливо, тому впроваджують додаткове підключення напруги до неінвертувального входу ОП через одномегаомний резистор.
5. Далі маємо RC-фільтр низьких частот: за формулою $f = 1/(2\pi\ \tau)$, *де* $\tau=RC$, маємо частоту зрізу в 5кГц, що знизить небажані «верхні» частоти.
6. Резистор R4, R5, RV1, конденсатори C3 та C4 утворюють фільтр нижніх та

верхніх частот, зі змінним резистором, що відповідає за «гучність»(тобто коефіцієнт підсилення) каскаду. Однак така структура дуже схильний до зайвих шумів, через що потрібно використовувати додатковий фільтр, описаний у п.2-5.

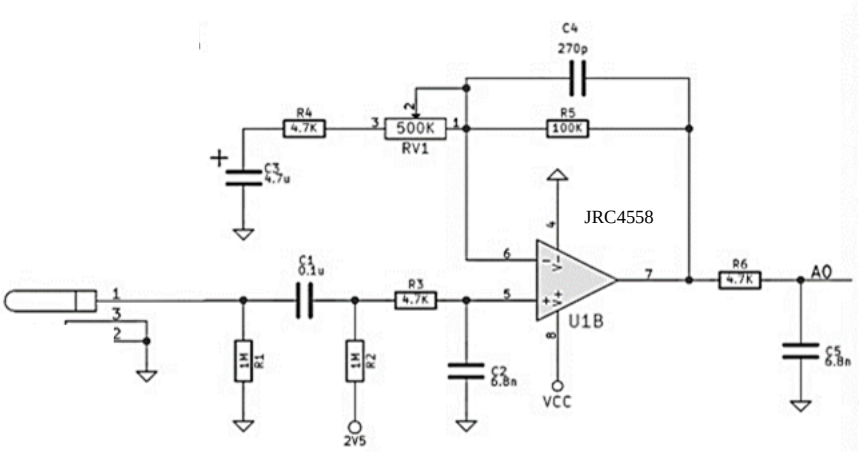

Рис.14 – Принципова схема вхідного підсилюючого каскаду на ОП з частотним фільтром.

Аналогічним шляхом утворюється вихідний каскад [19]:

1. Через те, що вихідні контакти після додавання ефекту до сигналу повинні бути підключені один до самого джерела сигналу, а інший відіграє роль GND, тому на МК потрібно використати 2 піни. Вони підключені через відповідні резистори R10 та R11, а з конденсатором C7 утворюють фільтр
2. Конденсатор C11 прибирає випадкову пульсацію живлення ОП.
3. Перед поданням сигналу до ОП сигнал проходить через дільник напруги на R12 та R13, а також проходить через два фільтри: ФНЧ та ФВЧ(R13 і C8; C9 і R12).
4. На виході маємо польовий конденсатор, що прибирає зайву пульсацію, тобто грає роль останнього фільтру.

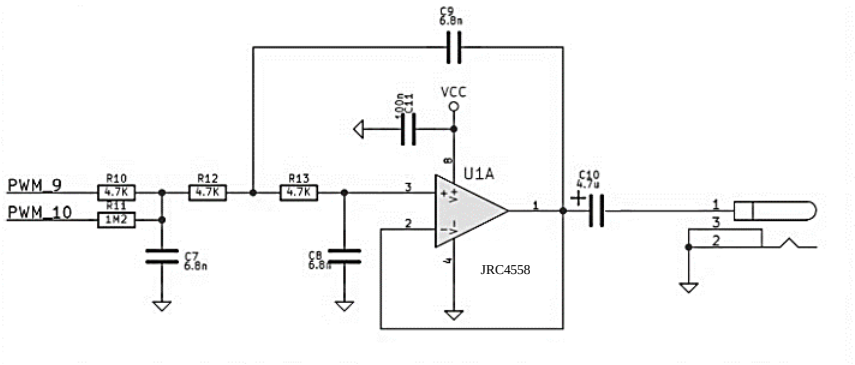

Рис.15 – Принципова схема вихідного підсилюючого каскаду на ОП з частотним фільтром.

Вважаючи, що дана структура працюватиме вийнятково від живлення самого модуля Arduino Uno, маємо наступну принципову схему:

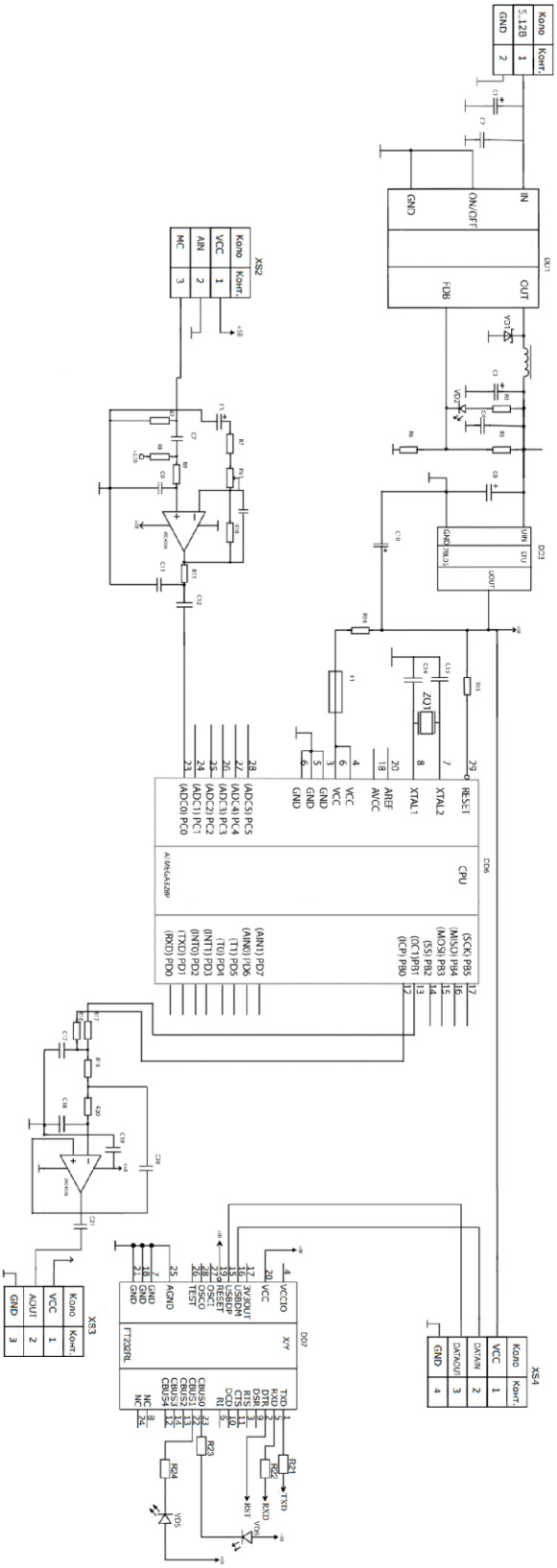

Рис. 16 – Принципова схема МК модуля та вхідних і вихідних фільтрів на підсилювачах(без додат. живлення)

В цьому випадку не враховується автономність приладу. Однак, за допомогою простого зарядного модулю для літій-іонних акумуляторних батарей на мікросхемах TP4056, DW01A та FS8205A, можна отримати живлення приладу, що не потребує постійного підключення до комп’ютеру/блоку живлення відповідної вихідної напруги[24].

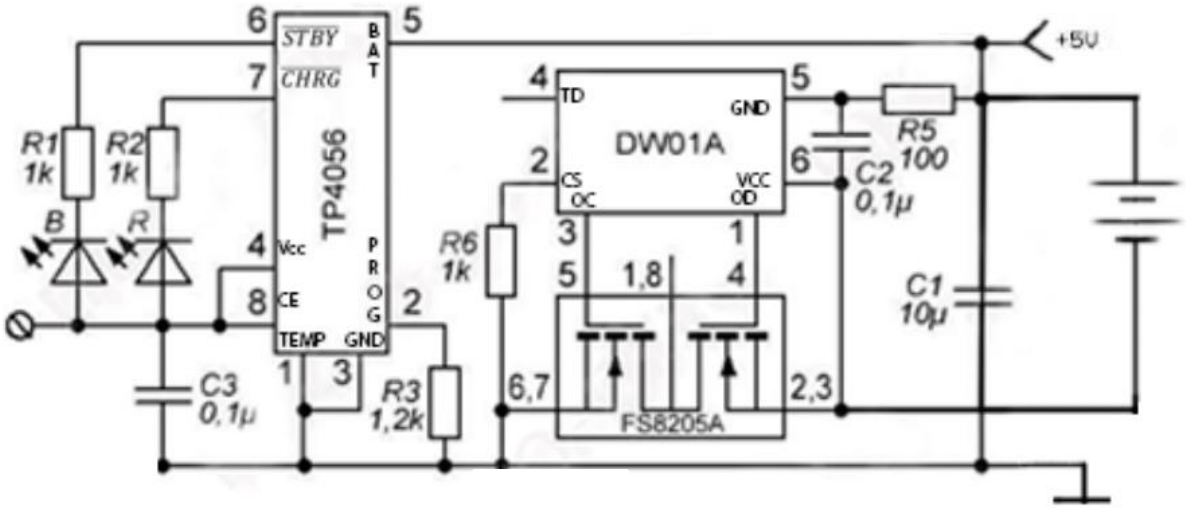

Рис.17 – Зарядний модуль із захистом від короткого замикання та перезаряду акумулятора.

В цьому модулі за контроль заряду відповідає мікросхема TP4056, до виводів якої підключено два світлодіоди, що грають роль індикаторів процесу заряду(7 пін) та повного заряду(8 пін). Завдяки 2 піну, використовуючи резистори від 1 кОм до 10 кОм можна регулювати струм під час зарядження. 1 пін являє собою детектор перегріву акумуляторної батареї, що призупиняє роботу модулю в критичному випадку.

Захист акумуляторної батареї виконують мікросхема DW01A та FS8205A. Перша є чутливим детектором справності під час зарядження, що через польові транзистори другої мікросхеми стабілізує чи обриває подачу напруги.

Стосовно кількості акумуляторів, ми можемо використовувати один чи кілька паралельно, щоб утворити допустиму робочу напругу 4.2-4 В.

Таким чином, ми отримуємо повну принципову електричну схему з можливістю автономного підтримування роботоздатності в ситуації обмеженого ресурсу живлення:

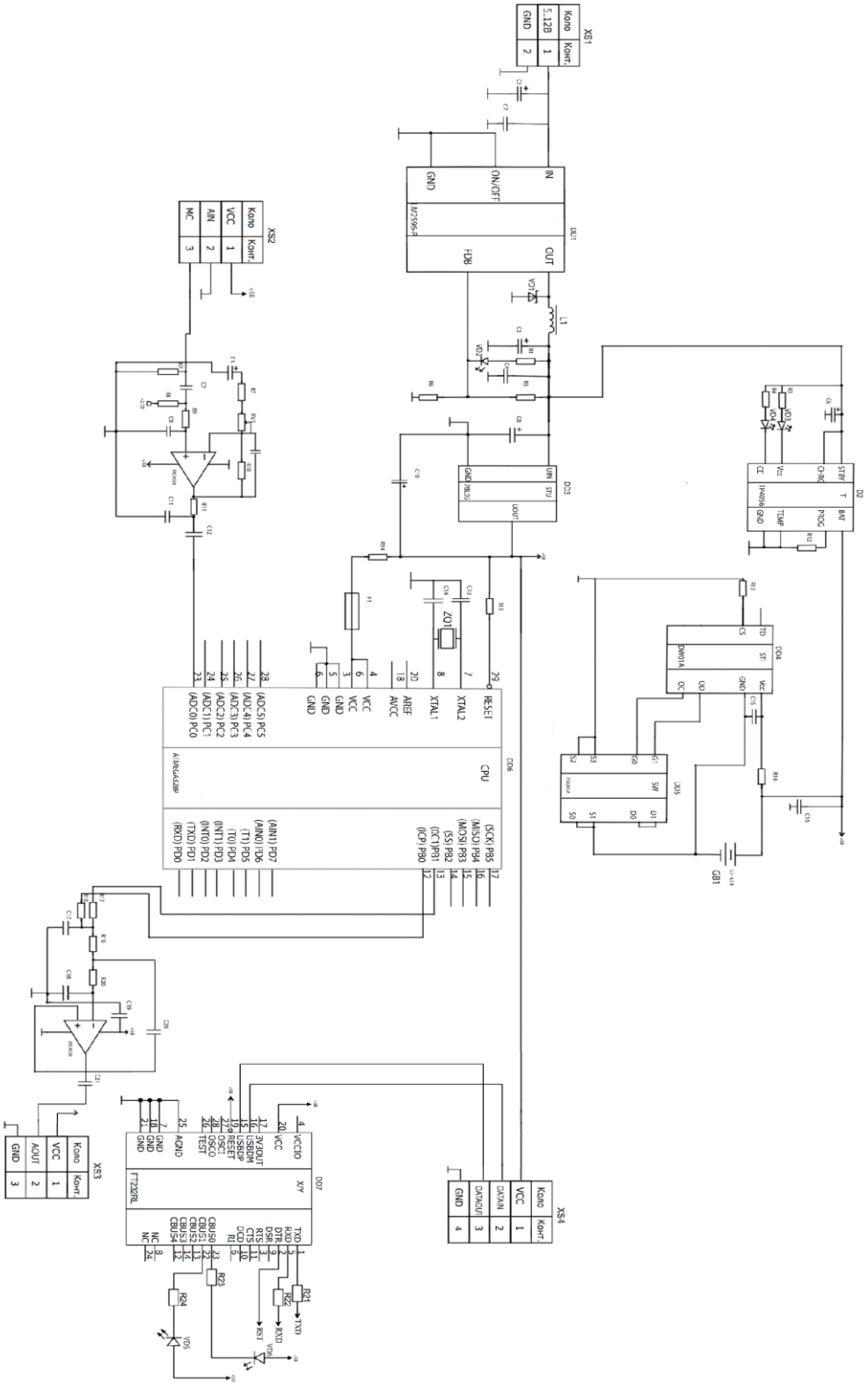

Рис. 18 – Принципова схема МК модуля та вхідних і вихідних фільтрів на підсилювачах

4 Розроблення програмного забезпечення пристрою, що проектується.

Існує велика кількість мов програмування, що дозволяють записати в пам’ять мікроконтролера потрібні вказівки для виконання завдань. З урахуванням обраного МК, вигідніше за все вибрати з них саме С++, або його аналоги С#/С[27].

Для роботи приладу на обраному мікроконтролері наша система команд(логічна система роботи приладу) на мові С++ має виглядати так:

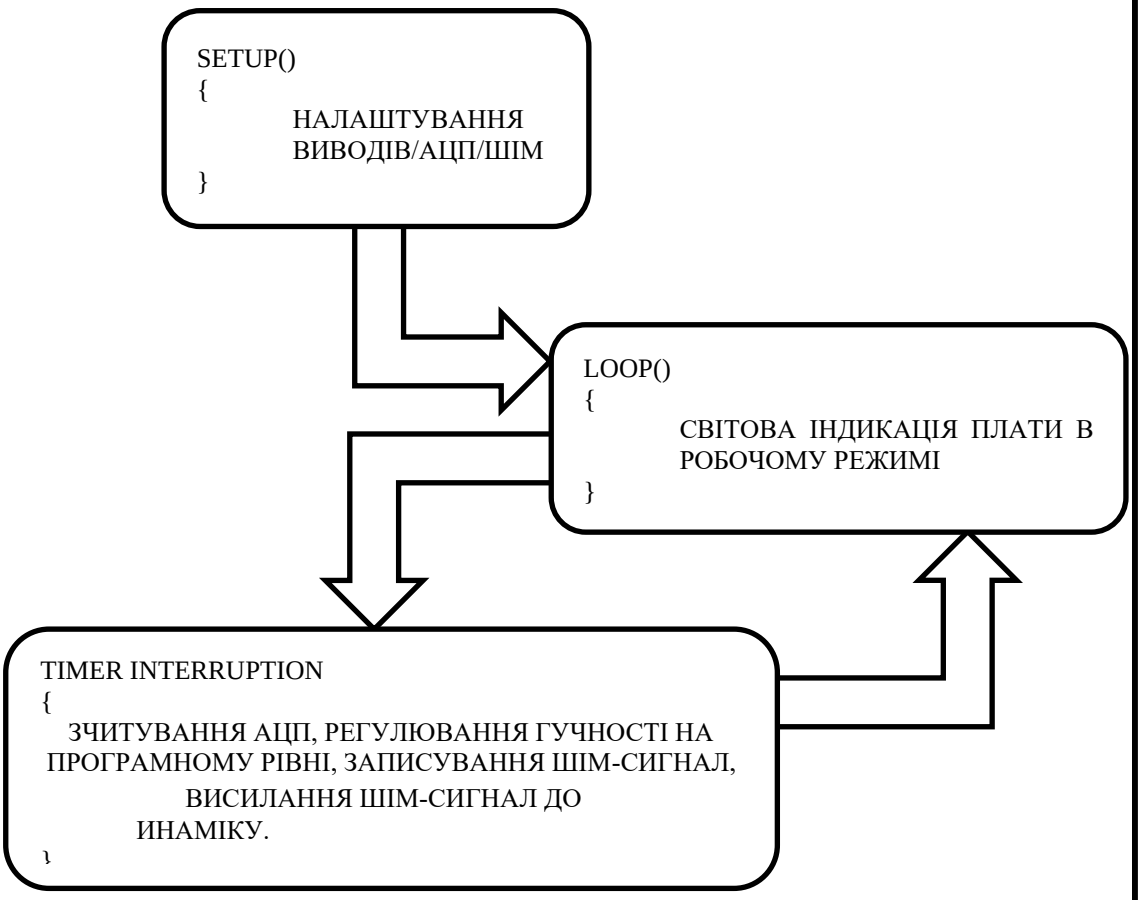

Рис.19 – Структурна схема роботи програми

Сам програмний код роботи педалі ефектів виглядає так:

```
// визначення апаратных ресурсів.
#define LED 13
#define FOOTSWITCH 12
#define TOGGLE 2
#define PUSHBUTTON_1 A5
#define PUSHBUTTON_2 A4

// визначення выхідных параметрів ШІМ
#define PWM_FREQ 0x00FF // частота ШИМ - 31.3 кГц
#define PWM_MODE 0      // Fast (1) или Phase Correct (0)
#define PWM_QTY 2     // 2 ШИМ параллельно (збільшення дискретизації вих.сигн.)

// інші змінні
int input, vol_variable=512;
int counter=0;
unsigned int ADC_low, ADC_high;

void setup()
{ // налаштування входів/ виходів и підтягуючих резисторов
  pinMode(FOOTSWITCH, INPUT_PULLUP);
  pinMode(TOGGLE, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PUSHBUTTON_1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PUSHBUTTON_2, INPUT_PULLUP);
  pinMode(LED, OUTPUT);

  // Налаштування АЦП - налаштован для читання автоматично.
  ADMUX = 0x60;  // ліве виравнювання, adc0, внутрішній vcc
  ADCSRA = 0xe5; // вмикання adc, ck/32, автозапуск
  ADCSRB = 0x07; // захват t1 для запуска
  DIDR0 = 0x01;  // вимкнути цифрові входи для adc0

   // налаштування ШІМ
```

```
  TCCR1A = (((PWM_QTY - 1) << 5) | 0x80 | (PWM_MODE << 1));
  TCCR1B = ((PWM_MODE << 3) | 0x11); // ck/1
  TIMSK1 = 0x20;
  ICR1H = (PWM_FREQ >> 8);
  ICR1L = (PWM_FREQ & 0xff);
  DDRB |= ((PWM_QTY << 1) | 0x02); // вмикання виходів
  sei(); // вімкнути прериванияна}

void loop()
{
  // Вімкнути світлодіод, якщо эффект увімкнено.
  if (digitalRead(FOOTSWITCH))
    digitalWrite(LED, HIGH);
  else
    digitalWrite(LED, LOW);
}

ISR(TIMER1_CAPT_vect) // переривання Timer 1
{
  // читання даних вхідного сигналу АЦП: 2 байти, старший и молодший
  ADC_low = ADCL;    // молодший байт повинен бути прочитан першим
  ADC_high = ADCH;
  // збірка вхідного сэмплу, склавши молодший та старший байти АЦП
  input = ((ADC_high << 8) | ADC_low) + 0x8000; // отримати знакове 16-
битн. значение

  // перевірка кнопки:
  counter++; // для економії ресурсів МК кнопки перевірятимуться кожний
100-ий раз
  if(counter==100)
  {
    counter=0;
    if (!digitalRead(PUSHBUTTON_1))
    {
```

```
    if (vol_variable<1024)
      vol_variable=vol_variable+1; // збільшити гучність
  }
  if (!digitalRead(PUSHBUTTON_2))
  {
    if (vol_variable>0)
      vol_variable=vol_variable-1; // зменшити гучність
  }
 }

 // амплітуда сигналу зменшена по змінній vol_variable, використовуючи функцію Arduino map
 input = map(input, 0, 1024, 0, vol_variable);

 // формування вихідного сигналу
 OCR1AL = ((input + 0x8000) >> 8); // перетворення у беззнаковий формат, відправка старшого байту
 OCR1BL = input; //  відправка молодшого байту
}
```

Даний приклад демонструє роботу пристрою, що описується с проекті, який контролює гучність в залежності від вхідного рівня сигналу, тобто виконує роль стабілізатора гучності, що контролюється перемикачем(дві кнопки, що за бажанням підключається в ланцюг

Інші ефекти гітарного процесору ефектів утворюються за подібним шаблоном з урахуванням особливостей ефекту. Наприклад,

```
//ініціація програми
#define LED 13
#define FOOTSWITCH 12
#define TOGGLE 2
#define PUSHBUTTON_1 A5
#define PUSHBUTTON_2 A4

//встановлення аргументів для ШІМ сигналу
```

```
#define PWM_FREQ 0x00FF // частота - 31.3KHz
#define PWM_MODE 0 // контролер фази(фазер)
#define PWM_QTY 2 // 2 PWMs in parallel

//інші аргументи
int input, distortion_threshold=6000;
int counter=0;
unsigned int ADC_low, ADC_high;

void setup() {
  pinMode(FOOTSWITCH, INPUT_PULLUP);
  pinMode(TOGGLE, INPUT_PULLUP);
  pinMode(LED, OUTPUT);

  // налаштування АЦП
  ADMUX = 0x60;
  ADCSRA = 0xe5;
  ADCSRB = 0x07;
  DIDR0 = 0x01;

  // Налаштування ШІМ
  TCCR1A = (((PWM_QTY - 1) << 5) | 0x80 | (PWM_MODE << 1));
  TCCR1B = ((PWM_MODE << 3) | 0x11);
  TIMSK1 = 0x20;
  ICR1H = (PWM_FREQ >> 8);
  ICR1L = (PWM_FREQ & 0xff);
  DDRB |= ((PWM_QTY << 1) | 0x02);
  }

void loop()
{
  if (digitalRead(FOOTSWITCH)) digitalWrite(LED, HIGH);
     else  digitalWrite(LED, LOW);
}
```

```
ISR(TIMER1_CAPT_vect)
{
  // АЦ перетворювання
  ADC_low = ADCL;
  ADC_high = ADCH;
  input = ((ADC_high << 8) | ADC_low) + 0x8000;

counter++;
if(counter==1000)
{
counter=0;
if (!digitalRead(PUSHBUTTON_2)) {
  if
(distortion_threshold<32768)distortion_threshold=distortion_threshold+25;
//контроль гучності(симуляція дисторшну)
    digitalWrite(LED, LOW); //blinks the led
    }

    if (!digitalRead(PUSHBUTTON_1)) {
  if        (distortion_threshold>0)distortion_threshold=distortion_threshold-25;
//decrease vol
  digitalWrite(LED, LOW); //blinks the led
    }
}

    if(input>distortion_threshold) input=distortion_threshold;
  OCR1AL = ((input + 0x8000) >> 8); // convert to unsigned, send out high
byte
  OCR1BL = input; // send out low byte
}
```

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуто пристрій для штучного відтворення модифікацій звуку гітарних музичних додатків. Такий підхід до утворення гітарного аксесуару відкриває для користувачів широкий спектр можливостей завдяки простоті виготовлення, відносній дешевизні та обмеженню лише здатністю задати параметри вихідного сигналу завдяки програмуванню мікроконтролера, що виконую роль CPU.

В польовому режимі даний пристрій проявив себе на оцінку достатньо добре, але не відмінно, оскільки потужності під час використання не достатньо для виконання комплексних задач в умовах концерту. Він стабільно і безперервно працював впродовж двух годин від наявного в приладі акумулятору, що напередодні був заряджений для повноцінного тестування без можливості живлення системи. Після першої години безперервного функціонування сигнал став слабшим через використання заряду АКБ, тому для стабілізації роботи на більш довгий період достатньо використати плати BMS для 2 та більше елементів живлення, або з’єднання кількох подібних акумуляторів у паралель для збільшення ємності АКБ та стабільної напруги у 4.2 В.

Єдиним недоліком пристрою даного пристрою є недостатня кількість пам’яті та потужності для повноцінної заміни габаритних та дорогих збірок гітарних педалей ефектів, але він нівелюється з використанням більш потужного мікроконтролера типу Atmega2560 та потужніших аналогів..

Таким чином, з професійної сторони я майже повністю задоволений використанням приладу, спроектованому мною в якості дипломного проекту(роботи), а недоліки в апаратній частині нівелюються більш точним ефектотворенням, що вже залежить від можливостей та знань особи, що програмує мікроконтролер.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. https://books.google.com.ua/books/about/Electronic_Circuit_Design_and_Applicatio.html?id=x3RREAAAQBAJ&source=kp_cover&redir_esc=y
2. https://books.google.com.ua/books/about/Electronic_Circuit_Design.html?id=nkxE_Bxh_vAC&source=kp_cover&redir_esc=y
3. https://www.rulit.me/books/iskusstvo-shemotehniki-tom-1-izd-4-e-read-451196-1.html
4. https://books.google.com.ua/books/about/Electronic_Circuits.html?id=rwWWvtQYEO0C&source=kp_cover&redir_esc=y
5. https://www.researchgate.net/figure/Electrical-scheme-of-the-read-out-circuit-along-with-the-nanotransducer-electrical-model_fig4_3329830
6. https://onlyfonlyfans.com/riamorharlotans.com/riamorharlot
7. https://ultimateelectronicsbook.com/maximum-power-transfer-and-impedance-matching/
8. https://www.hopeinelectronics.com.uk/m=isch&ved=2ahUKEwj3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=1FuaYsvHEcSzrgS8sJDwBw&bih=723&biw=1495&client=opera-gx&hs=aCb#imgrc=z_DP0F7VVe8KGM
9. https://electrochip.mk.ua/product/ponizhayushhij-dc-dc-preobrazovatel-lm2596/
10. https://fresh.co.ua/product-8083570707
11. https://micro-pi.ru/tp4056-%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8C-%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BA%D0%B8-li-ion/
12. https://habr.com/ru/post/444076/
13. https://tsibrov.blogspot.com/2019/02/atmega328p.html
14. https://3v3.com.ua/product_5443.html
15. https://www.researchgate.net/figure/Datasheet-ATMega328-Les-principales-caracteristiques-dATMega328-sont-FLASH_fig13_339999966
16. https://radiostorage.net/1519-skhemy-ehlektronnyh-viklyuchatelej-pitaniya-dlya-skhem-na-mikrokontrollerah.html
17. https://bestengineeringprojects.com/diy-arduino-controlled-guitar-pedal/
18. https://3v3.com.ua/product_5443.html
19. https://www.researchgate.net/figure/Electrical-scheme-of-the-read-out-circuit-along-with-the-nanotransducer-electrical-model_fig4_3329830
20. https://onlyfonlyfans.com/riamorharlotans.com/riamorharlot

21. https://xanimu.com/28848-furry-tentacle
22. https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/lcd-i2c-arduino-displey-ekran/
23. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28953/1/Pinchuk_bakalavr.pdf
24. http://arduinoprom.ru/arduino/291-dozator-na-arduino-kak-podkljuchit-tenzodatchik-k-hx711.html
25. http://hardelectronics.ru/stabilizator-78l05-parametry-raspinovka.html
26. https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/perehodnik-usb-uart-ft232-usb-uart_103106.html
27. https://myhentaigallery.com/gallery/thumbnails/9746https://myhentaigallery.com/gallery/thumbnails/9746
28. https://www.mini-tech.com.ua/ft232rl-usb-uart-preobrazovatel-smd
29. https://www.best-microcontroller-projects.com/dw01a.html
30. https://vse-e.com/novosti/elektricheskie-shemy-vidy-naznachenie
31. https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ams1117&gclid=CjwKCAjws8yUBhA1EiwAi_tpEV_aIP2RmdTcAUxV_bC-FGdUBTvbf5jvtq6ltI3OKHYaP1-fB_pnahoCmhwQAvD_BwE
32. https://community.element14.com/products/arduino/w/documents/3001/arduino-uno-rev-3-pinout-atmega168-328-pin-mapping-schematics-eagle-files-and-more
33. https://wm-help.net/lib/b/book/1865579333/54
34. https://habr.com/ru/post/112996/
35. https://www.allaboutcircuits.com/video-tutorials/op-amps-low-pass-and-high-pass-active-filters/
36. https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html
37. https://vpayaem.ru/information2.html
38. http://beriled.biz/data/files/tp4056new.pdf
39. Бережна О.В. Рівноважні коди в адаптивних завадостійких системах передачі інформації / Сердюк В.В, Мороз Н.В, Мазуркевич О.А, Борисенко О.А, Бережна О.В. // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2022). Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ, 2022. - С.64.

Додаток А

Рівноважні коди в адаптивних завадостійких системах передачі інформації

Борисенко О.А., *професор*; Бережна О.В., *доцент*; Сердюк В.В., *аспірант*; Мороз Н.В., *студент гр. ЕС-81*

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

Одним із актуальних завдань при побудові завадостійких систем передачі інформації є пошук методів завадостійкого кодування інформації, які б забезпечували свою ефективність в умовах зміни параметрів нестаціонарних каналів зв’язку.

Необхідна достовірність передачі повідомлень у таких системах досягається засобами завадостійкого кодування. Однак підвищення рівня завадостійкості кодування зменшує швидкість передачі інформації, яку можна підвищити шляхом зменшення надлишковості кодових комбінацій при їх передачі по каналу зв'язку з незначним рівнем завад. При значному рівні завад надлишковість завадостійких комбінацій треба збільшувати. Ефективний метод завадостійкого кодування дозволяє адаптувати свої алгоритми відповідно до рівня завад, що змінюється. Одним з таких кодів є рівноважний код, який дозволяє адаптувати довжину кодових повідомлень та свою завадостійкість в залежності від стану каналу зв’язку. При змінах внутрішньодобового та сезонного навантаження каналів зв’язку адаптивні алгоритми кодування дозволяють отримувати необхідну швидкість передачі інформації при забезпеченні достатнього рівня її завадостійкості. Так, зростання навантаження і відповідне збільшення рівня завад потребує збільшення довжини кодових комбінацій, а при зменшенні навантаження їх довжина може бути зменшена.

Отримати рівноважні коди можна на основі біноміальних кодів. Схожа структура цих кодів та такі їх спільні параметри, як довжина n і контрольне число k, спрощують формування рівноважних комбінацій. Змінюючи довжину рівноважних кодових комбінацій в залежності від рівня завад можна отримати оптимальне співвідношення між швидкістю передачі та завадостійкістю.

Таким чином, запропонований метод адаптивного рівноважного кодування є достатньо ефективним для створення завадостійких систем передачі інформації зі змінним рівнем завад у каналах зв’язку.